



Universidade de Aveiro Departamento de Matemática
2014

**Cátia Santos do
Couto**

**Um estudo do sequenciamento da produção da
Prébuild Alumínios**



Universidade de Aveiro Departamento de Matemática
2014

**Cátia Santos do
Couto**

Um estudo do sequenciamento da produção da Prébuild Alumínios

Relatório de projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Matemática e Aplicações, realizado sob a orientação científica da Doutora Maria Cristina Saraiva Requejo Agra, Professora Auxiliar do Departamento Matemática da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos.

o júri

presidente

Prof. Doutor Agostinho Miguel Mendes Agra

Professora auxiliar do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro

Prof^a. Doutora Ana Maria Pinto de Moura

Professora auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro

Prof^a. Doutora Maria Cristina Saraiva Requejo Agra

Professora auxiliar do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de algum modo acreditaram em mim, que me ajudaram a realizar mais um objetivo e a finalizar mais uma etapa da minha vida.

Gostaria de agradecer à empresa Prébuild Alumínios, S.A. pela oportunidade, bem como ao orientador da empresa, Sr. Paulo Simões, e aos restantes colegas da empresa pela ajuda demonstrada no estágio.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha orientadora da Universidade de Aveiro, Professora Doutora Maria Cristina Saraiva Requejo Agra, pelo apoio e disponibilidade demonstrados.

palavras-chave

Sequenciamento, Programação Linear Inteira, Programação por Restrições

resumo

Neste projeto analisamos o processo produtivo da Prébuild Alumínios de forma a melhorar o processo de planeamento e controlo da produção, a fim de aperfeiçoar a produtividade.

O sequenciamento, ação que faz parte do planeamento, é o foco principal deste projeto, para o qual se elaboram duas formulações distintas, uma formulação em programação linear inteira e outra em programação por restrições. Essas mesmas formulações são aplicadas a vários exemplos reais. Os resultados foram obtidos usando o *software Xpress-IVE*.

keywords

Sequencing, Integer Linear Programming, Constraint Programming

abstract

In this project we analyze the production process of Prebuild Alumínios to improve the process of planning and control of production, in order to improve productivity.

Sequencing, action that is part of the planning, is the main focus of this project, for which we elaborate two different formulations, one integer linear programming formulation and another in constraint programming. These formulations are applied to several real examples. The results were obtained using the *Xpress-IVE software*.

Índice

Índice	i
Índice de figuras	iii
Índice de tabelas.....	iv
1. Introdução.....	1
2. Planeamento e Controlo da Produção	3
2.1 Sistema de Produção.....	3
2.2 Planeamento da Produção	5
2.3 Controlo da Produção	11
2.4 Impacto do Planeamento e Controlo da Produção	12
3. Prébuild Alumínios, S.A.....	15
3.1 Apresentação da Empresa	15
3.2 Processo Produtivo.....	17
3.3 Caracterização e melhoria da situação encontrada	24
3.3.1 Planear	24
3.3.2 Sequenciar	25
3.3.2.1 Formulação Matemática em Programação Linear Inteira	27
3.3.2.2 Formulação Matemática em Programação por Restrições	29
3.3.3 Controlar	32
4. Resolução de alguns exemplos.....	33
4.1 Exemplo 1.....	33
4.2 Exemplo 2.....	38
4.3 Exemplo 3.....	43
4.4 Exemplo 4.....	46
5. Formulações com Prioridades.....	53
6. Conclusões	63

Bibliografia e Webgrafia.....	65
Anexo A – Lista de dados	

Índice de figuras

Figura 1: Modelo do sistema de produção.	4
Figura 2: Os vários níveis de planeamento.	7
Figura 3: Finalidades do planeamento de produção.	7
Figura 4: Exemplo de um sequenciamento numa única máquina.	9
Figura 5: Exemplo de um sequenciamento em máquinas paralelas.	9
Figura 6: Exemplo de um sequenciamento em <i>job-shop</i>	9
Figura 7: Exemplo de um sequenciamento em <i>flow-shop</i>	10
Figura 8: Exemplo de um sequenciamento em <i>open-shop</i>	10
Figura 9: O controlo da produção como um processo cíclico.	12
Figura 10: Os controlos dimensional e visual.	16
Figura 11: Matéria – prima.	17
Figura 12: Matriz.	17
Figura 13: Alimentador de billetes.	18
Figura 14: Forno de matrizes.	18
Figura 15: Etapa em que o bilete, previamente cortado, é queimado.	19
Figura 16: Saída da prensa de extrusão.	19
Figura 17: Púlpito principal.	20
Figura 18: Pistas.	20
Figura 19: Processo de encestamento.	21
Figura 20: Forno de envelhecimento.	21
Figura 21: Processo de embalagem.	22
Figura 22: Zona da separação de material.	22
Figura 23: Fluxograma do processo produtivo.	23

Índice de tabelas

Tabela 1: Características dos sistemas de produção discretos.....	5
Tabela 2: Dados referentes às matrizes do Exemplo 1.	33
Tabela 3: Quilos acumulados a partir do instante 12 para a formulação em programação linear inteira.	36
Tabela 4: Quilos acumulados a partir do instante 12 para a formulação em programação por restrições.	37
Tabela 5: Dados referentes às matrizes do Exemplo 2.	38
Tabela 6: Quilos acumulados a partir do instante 12 para a formulação em programação linear inteira.	41
Tabela 7: Dados referentes às matrizes do Exemplo 3.	43
Tabela 8: Dados referentes às matrizes do Exemplo 4.	46
Tabela 9: Quilos acumulados a partir do instante 12 na Solução nº1.....	50
Tabela 10: Quilos acumulados a partir do instante 12 na Solução nº2.	50
Tabela 11: Quilos acumulados a partir do instante 12 na Solução nº3.	51
Tabela 12: Prioridades das matrizes do Exemplo 1.	54
Tabela 13: Prioridades das matrizes do Exemplo 3.....	57

1. Introdução

Atualmente, com o aumento da competitividade nos mercados e com a globalização, a preocupação com a satisfação dos clientes tem vindo a crescer, pelo que as empresas esperam ter melhores previsões, melhores sistemas de planeamento, maior flexibilidade, melhor qualidade, maior eficiência e eficácia. Para tal, é necessário usar de forma cada vez mais otimizada os recursos de que a mesma dispõe.

A melhor maneira de otimizar os recursos e satisfazer os clientes é elaborar um bom Planeamento e Controlo da Produção (PCP). Este processo envolve, como o próprio nome indica, duas atividades essenciais – planear e controlar a produção. De forma sintetizada, o PCP é um sistema integrado de informações que visa coordenar o processo produtivo, disponibilizando os recursos necessários no momento certo, de forma a ter os produtos nas quantidades e datas precisas. Esta coordenação passa por verificar e corrigir pequenas falhas resultantes das diferenças entre o planeado e o produzido. Para o PCP produzir bons resultados é necessária uma forte comunicação entre todas as áreas da empresa.

Este trabalho consiste no relatório de estágio desenvolvido na empresa Prébuild Alumínios, no âmbito do planeamento da produção.

No Capítulo 2 é abordado com mais pormenor as funções do PCP. Primeiro é necessário definir sistema de produção, uma vez que só se existir o mesmo é que se vai usar um PCP numa empresa. Ainda neste capítulo é abordado com mais detalhe o planeamento, o sequenciamento e os diversos tipos existentes de cada um, bem como as regras usuais de sequenciamento. O controlo, última etapa do PCP é bastante importante, sendo também detalhada neste capítulo. Por último, são apresentados os impactos do PCP na medição do desempenho da produção.

No Capítulo 3 é apresentada a empresa Prébuild Alumínios, S.A., bem como o processo produtivo desenrolado na mesma. Descreve-se a situação encontrada e a forma como se tentou melhorar o PCP. É neste capítulo que se aborda o sequenciamento como um processo a otimizar e no qual são elaboradas duas formulações distintas para efetuarem o sequenciamento da produção.

No Capítulo 4 usamos as formulações de forma a obtermos soluções diferentes para os exemplos reais apresentados.

No Capítulo 5 são apresentadas formulações com base em estabelecimento de prioridades, aplicando estas mesmas formulações a dois exemplos.

Por fim, no último capítulo, Capítulo 6, são abordadas as conclusões retiradas do desenvolvimento deste projeto.

2. Planeamento e Controlo da Produção

A necessidade de elaborar e executar um Planeamento e Controlo da Produção (PCP) advém do facto de qualquer empresa possuir recursos físicos finitos, que impedem a execução das operações em qualquer altura.

A produção de bens apenas quando existe encomenda tem vindo a ser cada vez mais usada nas empresas, para diminuir assim a quantidade de armazenamento. Deste modo, a linha de produção tem de ser organizada de acordo com as necessidades dos clientes, observando a melhor forma de conseguir satisfazê-los.

Há que ter em consideração que elaborar um bom PCP é uma tarefa difícil já que podem existir várias possibilidades de o fazer e que depende muito da variedade de produtos e da quantidade a produzir. Contudo, é vital em qualquer indústria fazê-lo, nomeadamente para garantir que o processo de produção ocorra de forma eficiente e eficaz.

Segundo Russomano (1995), o PCP tem diversas funções, sendo algumas destas as seguintes:

- Definir quantidades a produzir;
- Emitir ordens de produção;
- Sequenciar as ordens de produção;
- Acompanhar a produção;
- Gerir as quantidades a armazenar.

2.1 Sistema de Produção

Um sistema de produção é um sistema que transforma, através de procedimentos estabelecidos, os insumos (matéria-prima, mão-de-obra, equipamentos) em saídas (produto final ou serviços) úteis para o cliente (ver Figura 1). Cada um dos procedimentos envolvidos no sistema é inter-relacionado com outro. Elaborar o estudo das ferramentas e métodos para melhoria da produtividade e redução de perdas deste sistema produtivo, através da otimização dos procedimentos, é uma mais-valia para atingir a máxima rentabilização do sistema produtivo, isto é, quanto mais eficientes forem os procedimentos

envolvidos, mais produtivo se torna todo o sistema. Por este motivo, o melhoramento e aperfeiçoamento destes sistemas deve ser um objetivo sempre presente em qualquer empresa e que depende da elaboração de um PCP.



Figura 1: Modelo do sistema de produção.

Segundo Tubino (2000), os sistemas de produção podem ser qualificados de acordo com as seguintes características:

- Grau de padronização dos produtos;
- Natureza do produto;
- Tipo de operação que sofrem os produtos.

No primeiro caso, podem ser classificados em sistemas que produzem produtos padronizados ou sistemas que produzem produtos sob medida. No caso de produtos padronizados, os bens possuem um alto grau de uniformidade e ocorre uma produção em larga escala. Por sua vez, no segundo caso a produção é feita para clientes específicos.

No segundo caso, classificam-se em produção de bens ou prestador de serviços, tendo em conta o tipo de produto/serviço da empresa.

No último caso, classificam-se em sistemas de processos contínuos ou sistemas de processos discretos, classificação associada ao grau de padronização do produto e ao volume de produção. No caso de processos contínuos, o fluxo de produção é constante (a matéria prima entra de um lado do sistema e sai do outro de forma contínua), os volumes de produção são elevados e existe uniformidade na produção. Os processos discretos subdividem-se ainda em processos repetitivos em massa, processos repetitivos em lote e processos por projeto. O volume de produção, a variedade de produtos e a flexibilidade são os parâmetros que distinguem estas três categorias, tal como se pode verificar pela Tabela 1:

Tabela 1: Características dos sistemas de produção discretos.
Adaptado de Tubino (2000)

	Repetitivo em massa	Repetitivo em lotes	Projeto
Volume de Produção	Alto	Médio	Baixo
Variedade de Produtos	Média	Grande	Pequena
Flexibilidade	Média	Alta	Alta

Existem, contudo, outros autores que classificam os sistemas de produção de outras maneiras, como é o caso de Chiavenato (2004) que os classifica nos seguintes tipos: sob encomenda, em lotes ou contínua. Um sistema de produção sob encomenda é usado quando se produz apenas depois de se receber uma encomenda. Um sistema de produção em lotes é usado quando se produz uma quantidade limitada de um determinado produto. Por último, o sistema de produção é dito contínuo quando se produz um certo produto durante algum período de tempo.

Os sistemas podem ainda ser classificados como tendo capacidade finita ou infinita. Um sistema diz-se de capacidade finita quando existem limitações na capacidade de produção e nos recursos disponíveis. Caso isto não aconteça, estamos perante um sistema de capacidade infinita.

Um sistema produtivo por si só não obtém sucesso, precisa da interação com três áreas fundamentais: produção, *marketing* e finanças. A produção é responsável por acrescentar valor ao sistema durante o processo de produção. O *marketing* é responsável por promover a venda dos bens/serviços produzidos no sistema de produção. Por último, a área das finanças está encarregue de gerir os recursos financeiros.

2.2 Planeamento da Produção

O planeamento da produção visa diminuir erros e incertezas relativas a possíveis imprevistos ou até mesmo para o futuro. Pretende ainda definir metas, princípios, objetivos, identificar meios para os alcançar, detalhar planos de ações para os atingir e escolher o plano que mais minimiza o esforço e o custo. Tendo em conta estes objetivos e a capacidade de produção, a tarefa do planeamento consiste

em trabalhar com os insumos, proporcionando um resultado de produção que alcance os objetivos previstos.

Dependendo do horizonte temporal pretendido para o planeamento, podemos distinguir três tipos de planeamento:

- Planeamento estratégico;
- Planeamento tático;
- Planeamento operacional.

Enquanto o primeiro atua a longo prazo, o segundo e o terceiro tipos de planeamento atuam a médio e a curto prazo, respetivamente. Embora sejam bastante distintos, devem colaborar em conjunto para atingir os objetivos gerais da empresa, sendo que se torna essencial haver coerência entre as deliberações tomadas nos diversos níveis.

O planeamento estratégico é um planeamento mais amplo e abrange toda a organização empresarial, aborda a empresa como uma totalidade e preocupa-se com objetivos e metas. Por sua vez, o planeamento tático preocupa-se em otimizar determinada área da organização, aborda cada unidade de trabalho separadamente e preocupa-se com os meios para atingir os objetivos e as metas estabelecidas no planeamento estratégico. O planeamento organizacional cria condições favoráveis para que a realização dos trabalhos diários da empresa, aborda cada operação ou tarefa isoladamente e preocupa-se com os métodos operacionais e alocação de recursos.

Com estas definições, é possível verificar que os dois últimos possuem mais detalhe do que o primeiro. As decisões tomadas nos níveis superiores restringem as dos níveis imediatamente inferiores, ou seja, existe um direcionamento das decisões, tal como apresentado na Figura 2.

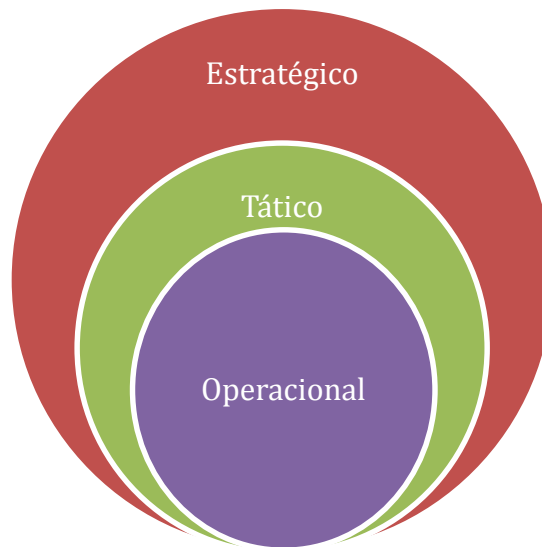


Figura 2: Os vários níveis de planeamento.

O planeamento estratégico envolve um horizonte de planeamento longo, superior a um ano. Por sua vez, o de nível inferior envolve um horizonte de médio prazo que pode ir desde os 6 meses até aos 12 meses. Por último, o planeamento operacional envolve um horizonte mais curto que pode ir apenas até algumas semanas, mas que também pode ser de poucos dias.

Segundo Chiavenato (1990), planear a produção visa decidir previamente o que fazer, quanto fazer, quando fazer, quem deve fazer e como fazer, tal como se representa na Figura 3.

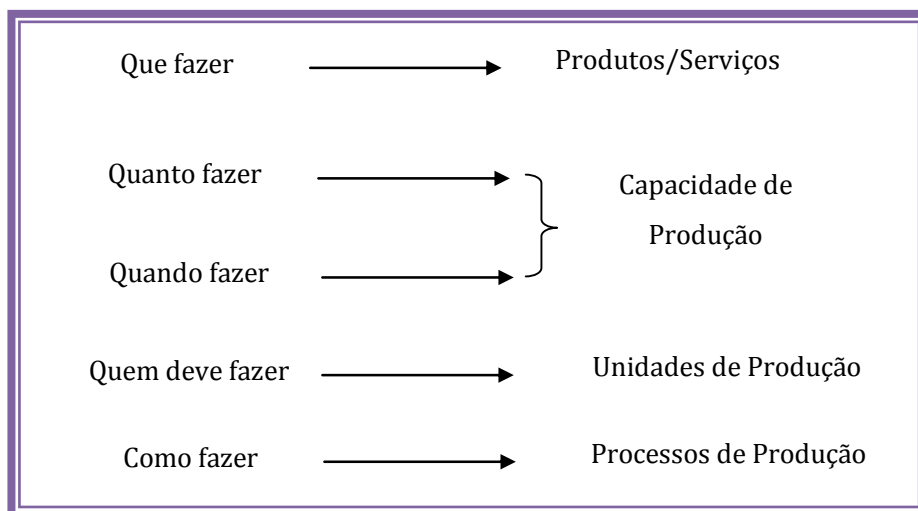


Figura 3: Finalidades do planeamento de produção.

Adaptado de Chiavenato (1990)

O planeamento da produção traduz-se numa previsão que é efetuada com base na capacidade de produção (quantidade de produção que pode ser efetuada

em condições normais) e na coordenação com os insumos disponíveis. Para a elaboração de um bom planeamento, é essencial que haja uma forte comunicação e sintonia entre as várias áreas da empresa.

Segundo Chiavenato (2008), o PCP tem vários princípios que regem o planeamento, sendo estes:

- Princípio da definição do objetivo: o objetivo deve ser claro e concreto, pois o planeamento é feito com base no objetivo que se quer alcançar.
- Princípio da flexibilidade de planeamento: o planeamento deve ser flexível, uma vez que tem de se poder moldar a possíveis imprevistos.

Uma vez que o planeamento é um processo dinâmico, é necessário elaborar revisões periódicas ao mesmo e até pode ser inevitável elaborar um replaneamento.

Quando se aborda o planeamento da produção, aborda-se também sequenciamento da produção.

Segundo Chiavenato (1990), o sequenciamento da produção é a ligação entre o planeamento, a execução e o controlo da produção. O objetivo do sequenciamento é estabelecer a melhor sequência produtiva, isto é, definir a ordem de entrada das tarefas na linha de produção, alocando no tempo as atividades e obedecendo a um conjunto de restrições. Pode-se afirmar que o sequenciamento é um processo que se baseia essencialmente em tomada de decisões, mas deve ter em conta vários objetivos, tais como, reduzir custos, desperdícios de tempo ou otimizar a utilização dos recursos.

Elaborar um sequenciamento além de permite ter um melhor sistema de atendimento da procura, pretende garantir as entregas das encomendas nas datas previstas e obter uma maior coordenação e integração de todas as áreas envolvidas no processo produtivo. Obter um sequenciamento já é bom, contudo obter o melhor sequenciamento significa racionalizar ainda mais o uso dos recursos existentes, sendo portanto relevante efetuar estudos do sequenciamento.

Os problemas de sequenciamento em sistemas de produção podem ser classificados em função do fluxo das operações nas máquinas. Os tipos possíveis de sequenciamento são apresentados em seguida, juntamente com um exemplo ilustrativo.

- Sequenciamento numa única máquina (*single machine*): todos os produtos são processados numa única máquina existente (ver Figura 4).

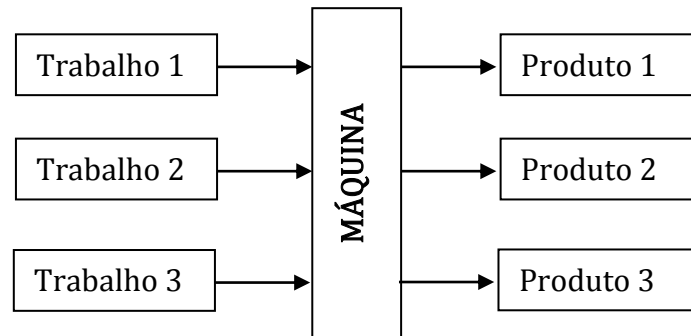


Figura 4: Exemplo de um sequenciamento numa única máquina.
Adaptado de Júnior (2007)

- Sequenciamento em máquinas paralelas (*parallel machine*): o produto a ser fabricado passa a ser realizado por uma máquina disponível no conjunto de máquinas existentes (ver Figura 5).

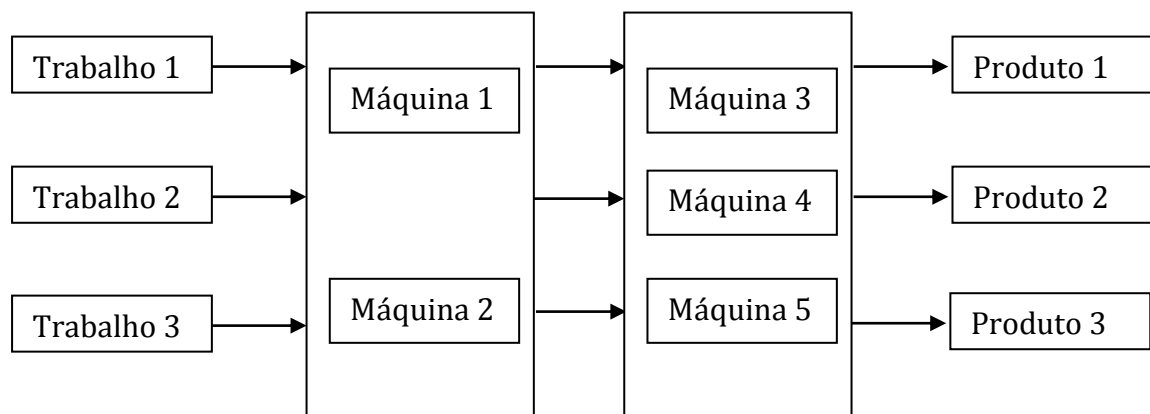


Figura 5: Exemplo de um sequenciamento em máquinas paralelas.
Adaptado de Júnior (2007)

- *Job-shop*: Um conjunto de máquinas executa determinadas operações sobre os trabalhos. No entanto, cada trabalho tem a sua própria rota, na qual pode haver repetição ou o não uso de algumas máquinas (ver Figura 6).

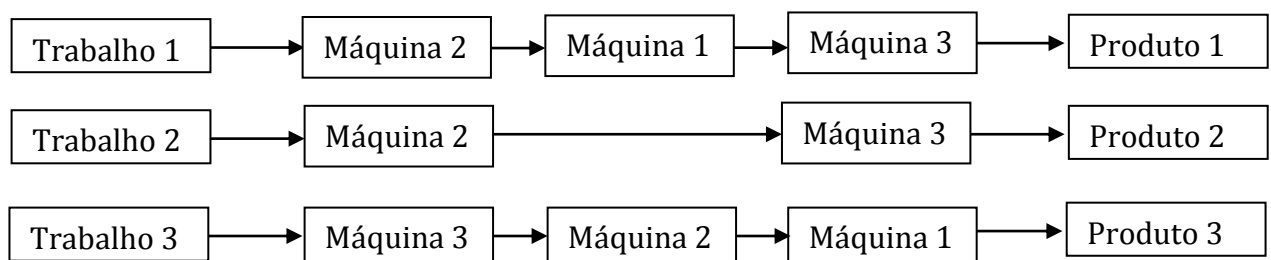


Figura 6: Exemplo de um sequenciamento em *job-shop*.
Adaptado de Júnior (2007)

- ***Flow-shop***: É um caso particular do *job-shop*. Neste caso, os trabalhos têm a mesma sequência de processamento no conjunto das máquinas, ou seja, a rota de produção é bem definida (ver Figura 7).

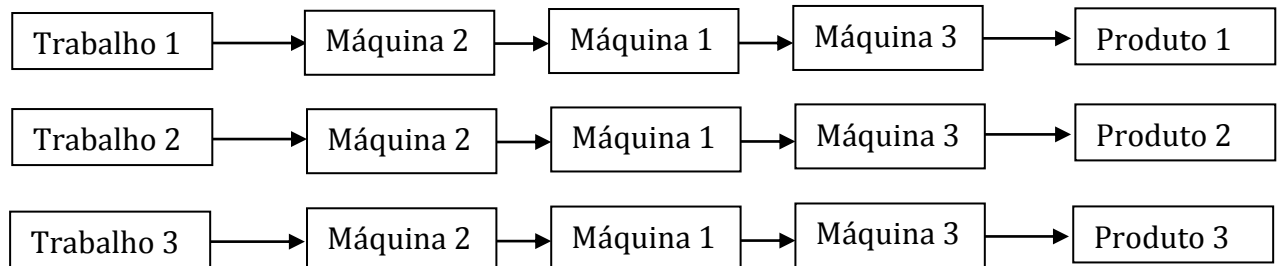


Figura 7: Exemplo de um sequenciamento em *flow-shop*.

Adaptado de Júnior (2007)

- ***Open-shop***: Os trabalhos a ser executados não têm uma rota pré-definida. A mesma máquina não pode estar a ser usada simultaneamente em trabalhos diferentes (ver Figura 8).

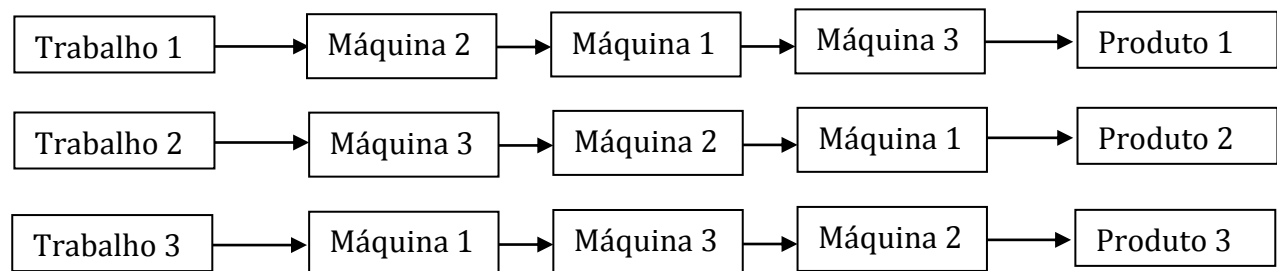


Figura 8: Exemplo de um sequenciamento em *open-shop*.

Adaptado de Júnior (2007)

Estes mesmos problemas de sequenciamento podem ainda ser classificados em função dos dados de entrada em dinâmicos ou estáticos. O primeiro caso está presente quando uma vez já iniciada a operação, os dados de entrada podem mudar. No caso de não poderem ser alterados, estamos perante o segundo caso.

Quando estamos a elaborar um sequenciamento há duas restrições que temos sempre de ter em extrema consideração: a não sobreposição de tarefas num equipamento e a que assegura a ordem das operações.

O sequenciamento da produção pode ser feito com base em diversas regras, tais como:

- ***FIFO (First In, First Out)***: a primeira que entra é a primeira que sai, ou seja, a prioridade é dada de acordo com a chegada dos pedidos ao sistema.

- LIFO (Last In, First Out): a última a entrar é a primeira a sair, ou seja, a prioridade é dada ao último pedido que entra no sistema.

- SPT (Shortest Processing Time): a tarefa que tem menos tempo de processamento, ou seja, a que fica menos tempo na linha de produção é a que é efetuada primeiro.

- LPT (Longest Processing Time): a tarefa que tem maior tempo de processamento é a efetuada em primeiro lugar.

- EDD (Earliest Due Date): as tarefas são processadas de acordo com a menor data de entrega, ou seja, as tarefas mais urgentes são efetuadas primeiro.

- CR (Critical Ratio): a prioridade da tarefa é dada pelo menor valor da razão crítica (RC), sendo este valor dado através da seguinte forma

$$RC = \frac{(\text{data entrega}) - (\text{data atual})}{\text{tempo de processamento}}$$

- DLS (Dynamic Least Slack): a prioridade é dada pela menor folga. Este valor é determinado do seguinte modo

$$\text{Folga} = \frac{(\text{menor valor de data de entrega}) - (\text{somatório dos tempos de processamento})}{\text{número de operações restantes}}$$

2.3 Controlo da Produção

O controlo da produção consiste na atividade de recolher e analisar as informações da produção com a finalidade de criar ações no caso de haver discrepâncias significativas entre o desempenho efetivo e o desempenho planeado, ou seja, pretende comparar o programado com o produzido, a fim de gerar possíveis soluções para corrigir erros resultantes deste processo. Segundo Chiavenato (2004), o controlo da produção pode então ser visto como um processo cíclico, tal como mostra a Figura 9 e, no qual há primeiro um estabelecimento de padrões (critérios de comparação), depois uma avaliação do desempenho, seguido da comparação com o planeado e no final a elaboração de ações corretivas. É pretendido que os desvios entre o produzido e o planeado sejam cada vez mais reduzidos e que se obtenha o aperfeiçoamento do sistema produtivo.

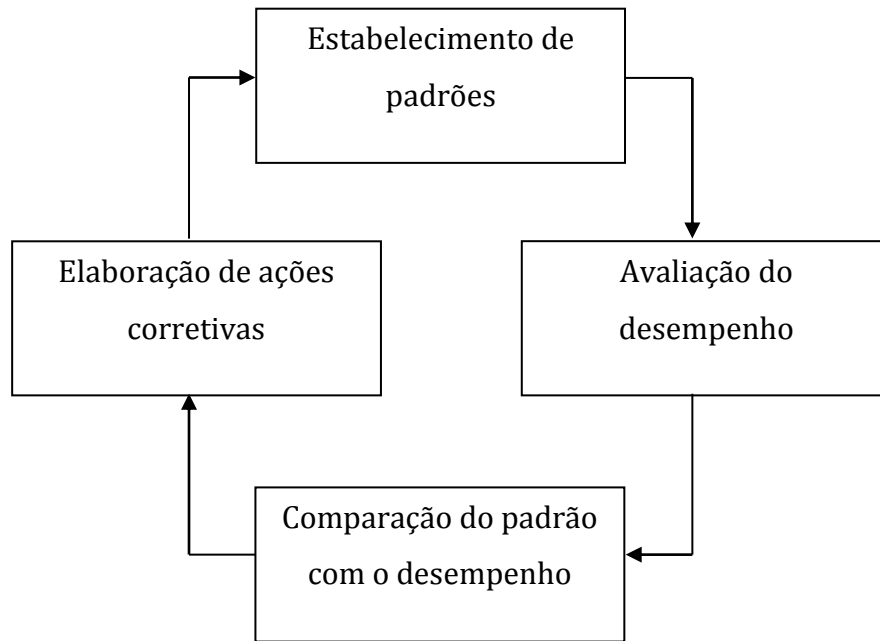


Figura 9: O controle da produção como um processo cíclico.
Adaptado de Chiavenato (2004)

Também é necessário fazer um controle no decorrer da produção, o chamado acompanhamento da produção, uma vez que pode haver alteração de lotes de produção, por exemplo devido ao surgimento de novas encomendas, alteração de pedidos de clientes ou avarias de equipamentos o que exige alterações nos planos de produção.

Em suma, o controle visa garantir a eficiência e eficácia do sistema produtivo.

2.4 Impacto do Planejamento e Controle da Produção

O PCP pelo que já foi descrito é muito importante nas empresas e tem de ser elaborado de acordo com os objetivos da empresa, tendo um bastante impacto na medição do desempenho da produção. Segundo Slack (1993), o desempenho da produção pode ser medido em função de cinco objetivos:

- Qualidade: refere-se a proporcionar produtos e serviços que estejam de encontro com as expectativas do consumidor;
- Rapidez: refere-se à capacidade de a empresa entregar os seus produtos mais depressa que a concorrência;

- Fiabilidade: refere-se à capacidade de se cumprir com os prazos estabelecidos;
- Flexibilidade: refere-se à habilidade da produção enfrentar e se adaptar a circunstâncias inesperadas;
- Custo: refere-se à capacidade de se conseguir produzir ao menor preço possível.

3. Prébuild Alumínios, S.A.

3.1 Apresentação da Empresa

A Prébuild Alumínios, S.A. é uma empresa do setor metalúrgico que surge da aquisição, em 29 de junho de 2010, por parte do grupo Prébuild, da até então Extruverde - Extrusão de Alumínios, S.A. Esta tem a sua sede na Zona Industrial da Mota, na Gafanha da Encarnação e tem o seu Sistema de Gestão da Qualidade certificado de acordo com os requisitos da norma NP EN ISO 9001.

Nesta empresa fabricam-se, por extrusão, perfis de alumínio e a sua missão consiste na criação de valor para os clientes, através da conceção, fabrico e comercialização de acessórios de alumínio, processo envolvido de elevada competência técnica. Estes acessórios de alumínio possuem elevados padrões de segurança, qualidade e fiabilidade.

A empresa encontra-se dividida em várias seções, sendo algumas destas as seguintes:

1. Seção de Planeamento
2. Seção de Matrizes
3. Seção de Extrusão
4. Seção de Embalagem/ Expedição
5. Seção de Poliamida
6. Seção de Manutenção

A Seção de Planeamento é responsável por planear a cadeia de abastecimento da linha de produção. Após a receção das encomendas por parte do Sistema de Apoio ao Cliente (SAC), lança ordens de fabrico diárias e planeia as matrizes e ferramentas necessárias.

Aquando a receção de novas matrizes, a Seção de Matizes é responsável por efetuar a elaboração de testes, correção e retoque das mesmas, a fim de que elas fiquem operativas e aptas a produzir. Esta seção é ainda responsável por garantir que as matrizes já existentes se encontrem operacionais.

A Seção de Extrusão é a responsável por garantir que o processo de extrusão decorre da melhor forma possível. Para tal, o programa da prensa de

extrusão faculta ao operador de prensa todos os detalhes que o mesmo necessita monitorizar para satisfazer a ordem de fabrico. É essencial que os controlos (dimensional e visual) sejam elaborados, tal como mostra a Figura 10.

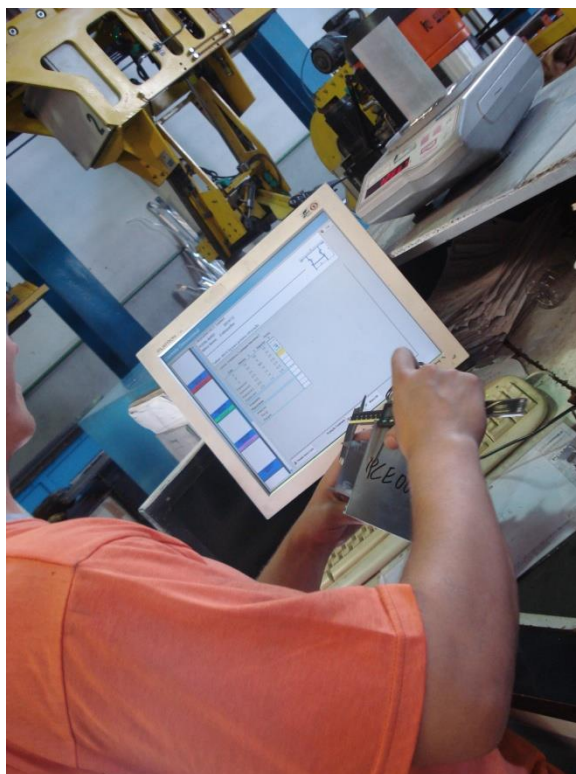


Figura 10: Os controlos dimensional e visual.

A ordem de fabrico ainda fornece ao operador de corte os dados para que este corte seja feito à medida pretendida.

Na Seção de Embalagem/ Expedição é controlada a dureza do perfil. Ainda nesta seção os perfis são, manualmente, protegidos por um filme e, automaticamente, são embalados com cartão ou plástico. Esta seção é ainda responsável pela separação dos perfis, de acordo com as necessidades do cliente.

No caso de o perfil desejado ser de rutura térmica ou rasgado, esta seção passa os perfis para a Seção de Poliamida, na qual se elabora o cravamento ou o rasgo de perfis, sendo que só depois são embalados para seguirem para o cliente.

Por último, a Seção de Manutenção tem como função garantir que as máquinas funcionem corretamente, evitando ao máximo as avarias. Para este fim, é elaborado um plano anual de manutenção, onde se projetam as ações preventivas e preditivas, de todos os equipamentos.

A Prébuild Alumínios também recebe encomendas de perfis lacados ou anodizados, embora este processo não seja elaborado na mesma.

3.2 Processo Produtivo

O processo produtivo só existe se existir matéria- prima, liga de alumínio denominada de bilete (tarugo ou lingote), que se encontra na Figura 11 e matrizes, que são blocos de aço com um ou mais orifícios que dão forma ao perfil, apresentando-se na Figura 12 um exemplo de uma.



Figura 11: Matéria – prima.



Figura 12: Matriz.

O processo de extrusão é o processo base desta empresa, o qual se define como sendo um processo de conformação mecânica, no qual o metal é sujeito a uma deformação plástica e quente. Esta deformação resulta da resistência imposta pela matriz à passagem do metal.

De seguida apresenta-se, de uma forma mais detalhada todo o processo envolvente ao processo produtivo da Prébuild Alumínios.

Aquando a receção da matéria-prima, esta é controlada em termos do diâmetro, do peso e da composição química, para ver se esta está apta a ser utilizada. Depois de se verificar que esta pode ser usada, pode-se dar início ao processo produtivo.

O bilete é lavado com jatos de água, de forma a eliminar as impurezas existentes. De seguida, segue para o alimentador de biletos (figura 13) e, posteriormente, para o forno de biletos onde é aquecido homogeneamente.



Figura 13: Alimentador de biletos.

Entretanto, para o processo de extrusão ter início é necessário que as matrizes e o porta-matriz estejam quentes, aquecimento que dura cerca de 4 horas e que se realiza no forno de matrizes (figura 14) a uma temperatura que ronda os 400-450 °C. Depois de aquecida, a matriz que se encontra dentro do porta-matriz é levada para a prensa, conjuntamente com o bolster ou o insert e porta-insert respetivo.



Figura 14: Forno de matrizes.

O processo de extrusão pode agora começar. O bilette é cortado, mediante o uso de cizalha quente e consoante a medida descrita na ordem de fabrico. É queimado com acetileno de forma a este não agarrar à cabeça da prensa (figura 15) e segue para a prensa onde se desenrola o processo todo.



Figura 15: Etapa em que o bilette, previamente cortado, é queimado.

O processo de extrusão (figura 16) é controlado por um prensista que controla as operações da prensa através do púlpito principal, representado na Figura 17. O perfil vai sendo extrudido e com a ajuda de puller's é transportado até ao final das pistas, sendo depois cortado com a serra móvel.



Figura 16: Saída da prensa de extrusão.



Figura 17: Púlpito principal.

Estas mesmas pistas encontram-se divididas em 5 zonas distintas – extrusão, arrefecimento, esticamento, espera, corte – e podem ser visualizadas da direita para a esquerda na Figura 18. Assim sendo, o perfil é sujeito a um leve arrefecimento, depois ao esticamento, o qual pretende endireitar e aliviar tensões ao perfil, e posteriormente é cortado segundo as medidas pretendidas, por intermédio da serra fria. Na Figura 18 podem ser vistos alguns perfis na zona de esticamento.



Figura 18: Pistas.

Os perfis são encestados, processo representado na Figura 19, de tal forma que cada camada é separada por barretas (de pano ou não), dependendo sempre do perfil que se trata. É necessário efetuar esta separação para o ar circular melhor entre os perfis.



Figura 19: Processo de encestamento.

O envelhecimento é o processo seguinte. Este processo pretende dar dureza ao material. Consoante a dureza pretendida, o arrefecimento pode ser artificial ou natural, no caso de ser feito num forno de envelhecimento (figura 20) ou à temperatura ambiente, respetivamente.



Figura 20: Forno de envelhecimento.

É essencial que depois de envelhecido, o perfil arrefeça. O perfil de seguida sofre a operação de cravação ou de rasgo (se for necessário), é embalado (figura 21) e separado para os clientes. A zona onde se efetua a separação está representada na Figura 22. No caso de o tratamento do perfil ser de lacagem ou acetinagem, tratamentos não efetuados na Prébuild Alumínios, os perfis são embalados, seguem para o local de tratamento, regressam à Prébuild Alumínios depois de tratados e só depois vão para o cliente.



Figura 21: Processo de embalagem.



Figura 22: Zona da separação de material.

O fluxograma que resume todo o processo produtivo dentro da Prébuild Alumínios está representado na figura 23.

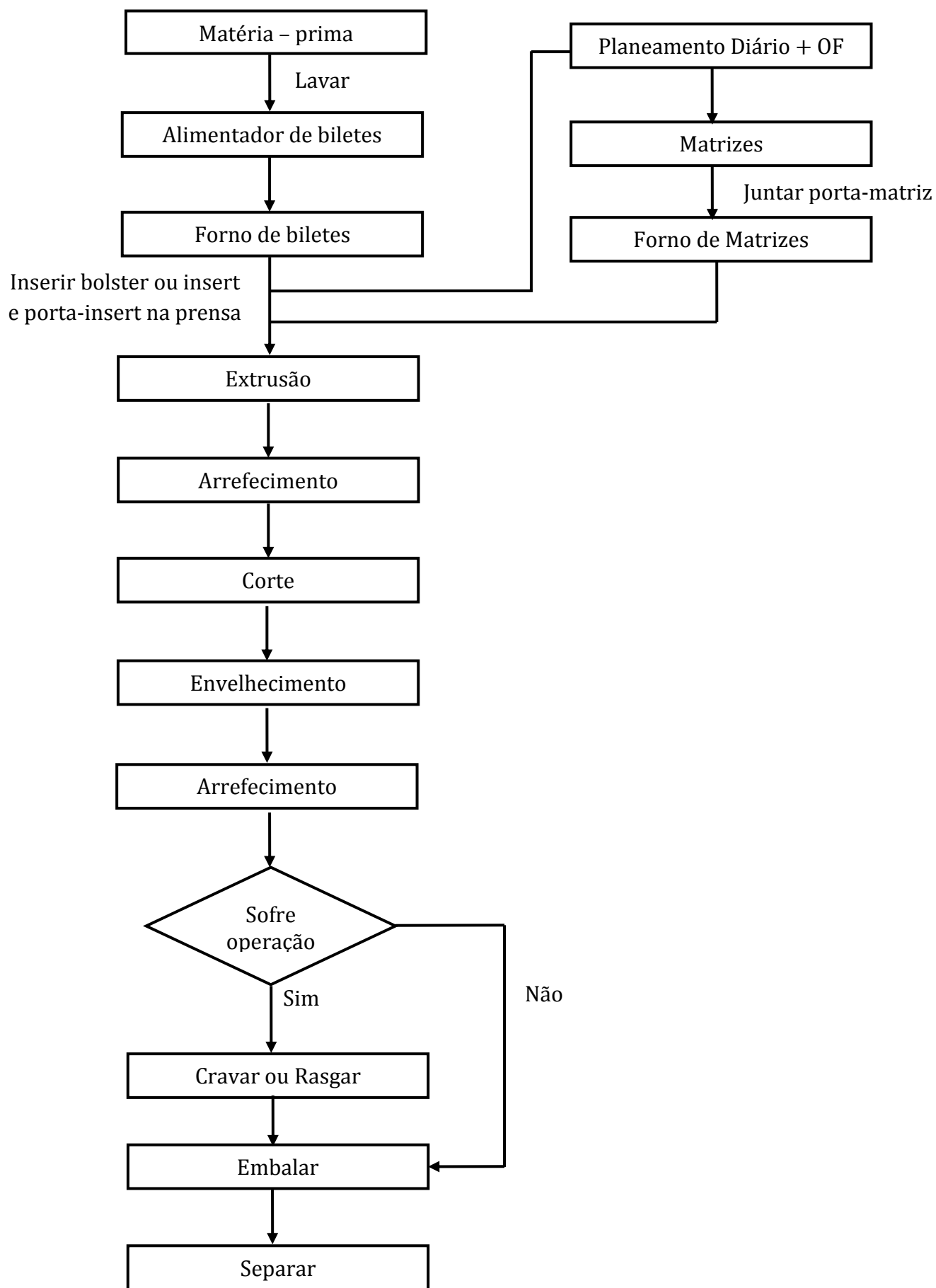


Figura 23: Fluxograma do processo produtivo.

3.3 Caracterização e melhoria da situação encontrada

A seção de planeamento, seção na qual foi desenvolvido o projeto, não possuía grande organização, o planeamento da produção era efetuado sem grande análise de decisões e não havia um objetivo claro que se pretendesse alcançar. Além disso, o sequenciamento da produção não existia, este trabalho era deixado para os responsáveis de prensa.

Pretende-se, na Prébuild Alumínios, produzir em maiores quantidades de forma a diminuir a percentagem de sucata produzida. Já no sentido de reduzir esta sucata, sempre que se produz um perfil, a quantidade mínima de produção é de 250 quilos.

É necessário começar a planear, sequenciar e controlar de forma contínua, tornando a seção de planeamento uma fonte de informação para as restantes áreas, não falhando nos prazos de entrega com os clientes. Foram estas três tarefas mencionadas anteriormente que foram desenvolvidas no estágio e que detalhamos um pouco mais nas seções seguintes.

3.3.1 Planear

Sempre que é recebida uma encomenda, é separado o material que há em armazém. Posteriormente, a seção de planeamento é responsável por confirmar se é possível satisfazer a entrega daquela encomenda na semana em que o cliente pretende, conforme as faltas da encomenda, a capacidade de produção e os insumos ainda disponíveis para a semana pretendida para a entrega. Caso não seja possível, é necessário comunicar essa decisão ao Sistema de Apoio ao Cliente (SAC) para este comunicar com o cliente. Caso seja possível, a encomenda é inserida numa folha de cálculo, onde se encontra toda a lista de material em falta, bem como as quantidades a produzir de cada um. É consoante as semanas de entrega das encomendas, as rotas que se pretendem efetuar com os veículos disponíveis, as quantidades a produzir e a matéria-prima disponível que se prepara o que produzir nos diversos dias de uma certa semana. Deste modo, o planeamento de produção aplicado na Prébuild Alumínios é o designado de planeamento a curto prazo.

3.3.2 Sequenciar

Depois de decidir o que produzir em cada dia, é necessário elaborar a cadeia das ordens de fabrico diárias da melhor forma, ou seja, o sequenciamento da produção. Na Prébuild Alumínios apenas existe uma prensa, podendo o problema de sequenciamento aproximar-se do tipo de sequenciamento numa única máquina. Para efetuar um sequenciamento, é imprescindível elaborar o levantamento das quantidades existentes dos diversos tipos de:

- Porta-matrizes
- Bolster's
- Inserts
- Porta-insert's

A nível do planeamento de produção, a otimização de processos pode ser aplicada em diversas áreas e em diversos níveis. Neste projeto, o processo a otimizar é o sequenciamento. Para obtermos um bom sequenciamento, vamos elaborar modelos que nos permitam decidir a ordem de produção tendo em conta todas estas condições que é necessário satisfazer.

De forma a desenvolver uma formulação que nos permita solucionar problemas de otimização, deve-se ter em consideração os seguintes passos:

- a) Analisar o processo e as suas variáveis;
- b) Desenvolver o modelo mais adequado para o processo;
- c) Usar o modelo;
- d) Analisar a solução obtida.

De forma a desenvolver o modelo, temos de ter em consideração:

- Função objetivo: função matemática que se pretende maximizar ou minimizar;
- Variáveis de decisão: incógnitas a serem determinadas;
- Restrições: condições impostas ao problema e que modelam o comportamento que o mesmo pode tomar. Estas restrições podem ser ou de igualdade ou de desigualdade.

Torna-se importante obter um bom sequenciamento dada a variedade de perfis que são necessários produzir diariamente e a diversidade de ferramentas indispensáveis para a elaboração da extrusão de um perfil. É, portanto, necessário desenvolver uma ferramenta capaz de efetuar um sequenciamento possível para a produção. A fim de haver produção de um perfil usando uma determinada matriz, para além de ter de haver matéria-prima, é necessário que haja disponibilidade do porta-matriz (que vai com a matriz ao forno), do bolster ou do insert e do porta-insert (que se colocam na prensa momentos antes da extrusão) que são específicos de cada matriz. É ainda necessário saber a quantidade de quilos a produzir da matriz. Uma vez que existe uma única extrusora, o sequenciamento terá de ter em atenção as seguintes condições:

- (C1) Só se pode produzir uma matriz de cada vez;
- (C2) Cada matriz é produzida uma única vez;
- (C3) Não se podem sequenciar/extrudir duas matrizes consecutivamente que usem o mesmo bolster, se só existir uma unidade do mesmo;
- (C4) Não se podem sequenciar duas matrizes consecutivamente que usem o mesmo insert, se só existir uma unidade do mesmo;
- (C5) Não se podem extrudir duas matrizes consecutivamente que usem o mesmo porta-insert, se só existir uma unidade do mesmo;
- (C6) A matriz que se encontra em produção e as 12 que se encontram nos fornos de matrizes (um total de 13 matrizes consecutivas) não podem exceder a capacidade de porta-matrizes existentes de cada tipo;
- (C7) O tempo de duração de produção de 12 matrizes consecutivas tem de ser de pelo menos 300 minutos ou, uma vez que em 15 minutos se produzem 250 quilos, a quantidade produzida por 12 matrizes consecutivas tem de ser de pelo menos 5000 quilos. Esta restrição garante que assim que as matrizes sequenciadas anteriormente tiverem produzido, existe uma matriz que possa produzir, sem a prensa ter de parar.

Para melhor definir o problema temos de considerar os seguintes valores e definir os seguintes conjuntos:

- NM o número de matrizes a produzir;
- $CM = \{1, \dots, NM\}$, o conjunto das matrizes a produzir;

- NPM o número de diferentes tipos de porta matrizes existentes;
- $NportaMatriz(i)$ indica o número de porta matrizes disponíveis do tipo $i, \forall i = 1, \dots, NPM$;
- NB o número de diferentes tipos de bolster's existentes;
- $Nbolster(i)$ indica o número de bolster's disponíveis do tipo $i, \forall i = 1, \dots, NB$;
- $NIns$ o número de diferentes tipos de insert's existentes;
- $Ninsert(i)$ indica o número de insert's disponíveis do tipo $i, \forall i = 1, \dots, NIns$;
- $NPIns$ o número de diferentes tipos de porta-insert's existentes;
- $NportaInsert(i)$ indica o número de porta-insert's disponíveis do tipo $i, \forall i = 1, \dots, NPIns$;

De seguida, vamos descrever duas formulações que desenvolvemos para determinar um sequenciamento para a produção das matrizes, uma em Programação Linear Inteira e outra em Programação por Restrições, visto que nos parecem ser as duas que possam vir a ter resultados úteis. Começamos por apresentar a formulação em Programação Linear Inteira.

3.3.2.1 Formulação Matemática em Programação Linear Inteira

Para obtermos uma formulação em programação linear inteira (mais propriamente binária) para o problema vamos usar as variáveis binárias $x_{t,m}, \forall t, m \in CM$ como variáveis de decisão. Estas variáveis vão indicar se a matriz m é executada no tempo t , $x_{t,m} = 1$, ou não, tomando neste caso o valor zero ($x_{t,m} = 0$).

É necessário definir ainda:

- $Matriz(m).portamatriz \in \{1, \dots, NPM\}$ indica o tipo de porta matriz que a matriz m usa;
- $C_{PM}(i) = \{m \in CM: Matriz(m).portamatriz = i\}$ o conjunto das matrizes a colocar em produção que usam o porta-matriz de tipo $i, \forall i = 1, \dots, NPM$;
- $Matriz(m).bolster \in \{1, \dots, NB\}$ indica o tipo de bolster que a matriz m usa;

- $C_B(i) = \{m \in CM: Matriz(m).bolster = i\}$ o conjunto das matrizes a colocar em produção que utilizam o bolster de tipo $i, \forall i = 1, \dots, NB$;
- $Matriz(m).insert \in \{1, \dots, NIns\}$ indica o tipo de insert que a matriz m usa;
- $C_{Ins}(i) = \{m \in CM: Matriz(m).insert = i\}$ o conjunto das matrizes a colocar em produção que usam o insert de tipo $i, \forall i = 1, \dots, NIns$;
- $Matriz(m).portainsert \in \{1, \dots, NPIns\}$ indica o tipo de porta-insert que a matriz m usa;
- $C_{PIns}(i) = \{m \in CM: Matriz(m).portainsert = i\}$ o conjunto das matrizes a colocar em produção que usam o porta-insert de tipo $i, \forall i = 1, \dots, NPIns$;
- $Matriz(m).quilos \in [250, 10000]$ indica a quantidade, em quilos, a colocar em produção da matriz $m, \forall m \in CM$.

Neste tipo de formulações, precisamos de definir uma função objetivo. Uma vez que apenas se pretende obter uma ordem das matrizes a produzir que satisfaça as restrições impostas, sem qualquer objetivo adicional, a função a considerar acaba por não ser importante pelo que se optou por usar uma que seja simples, como por exemplo a representada na formulação.

$$\min \sum_{t,m \in CM} x_{t,m}$$

sujeito a

$$(1) \sum_{m \in CM} x_{t,m} = 1,$$

$$\forall t \in CM$$

$$(2) \sum_{t \in CM} x_{t,m} = 1,$$

$$\forall m \in CM$$

$$(3) x_{t,m_1} + x_{t,m_2} \leq 1,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM - 1\}, m_1, m_2 \in C_B(i) \wedge Nbolster(i) = 1, i \in \{1, \dots, NB\}$$

$$(4) x_{t,m_1} + x_{t,m_2} \leq 1,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM - 1\}, m_1, m_2 \in C_{Ins}(i) \wedge Ninsert(i) = 1, i \in \{1, \dots, NIns\}$$

$$(5) x_{t,m_1} + x_{t,m_2} \leq 1, \\ \forall t \in \{1, \dots, NM - 1\}, m_1, m_2 \in C_{PIIns}(i) \wedge NportaInsert(i) = 1, i \in \{1, \dots, NPIIns\}$$

$$(6) \sum_{m \in C_{PM}(i)} \sum_{k \in \{t, \dots, t+12\}} x_{k,m} \leq NportaMatriz(i), \\ \forall i \in \{1, \dots, NPM\}, \forall t \in \{1, \dots, NM - 12\}$$

$$(7) \sum_{m \in CM} \sum_{k \in \{t, \dots, t+11\}} Matriz(m).quilos * x_{k,m} \geq 5000, \\ \forall t \in \{1, \dots, NM - 11\}$$

$$(8) x_{t,m} \in \{0,1\}, \\ \forall t, m \in CM$$

As restrições descritas entre os números (1) e (7) dizem respeito, respetivamente às condições (C1) a (C7) referidas como condições do problema a satisfazer. A última restrição, a restrição (8), refere-se ao domínio da variável binária existente neste modelo, aos valores que esta variável pode tomar.

3.3.2.2 Formulação Matemática em Programação por Restrições

A programação por restrições (*Constraint Programming (CP)*) é uma técnica de resolução de problemas que consiste no estabelecimento de restrições sobre um conjunto de variáveis de decisão, cujo domínio é previamente definido, e para o qual se pretende obter uma solução satisfazendo todas as restrições. As restrições consistem em relações estabelecidas entre as diversas variáveis. O uso desta técnica pressupõe o estabelecimento de um Problema de Satisfação de Restrições. Este problema define-se usando um conjunto de variáveis, um conjunto de valores possíveis para cada variável (o seu domínio) e um conjunto de restrições entre as variáveis. Uma solução para este problema consiste na atribuição de um valor, do seu domínio, para cada variável satisfazendo todas as restrições. A sua resolução consiste numa estratégia de propagação de restrições na qual as restrições são usadas ativamente para obter valores inadmissíveis para as variáveis. Esses valores são retirados dos seus domínios e a informação é

propagada às restantes restrições. Este mecanismo é repetido enquanto for possível obter novas deduções. A propagação de restrições está, portanto associada a técnicas de procura em árvore. As soluções são encontradas através de uma exploração sistemática quer do espaço de soluções, quer de atribuições individuais.

Para definirmos uma formulação em *CP* – o problema de satisfação por restrições – precisamos de definir as seguintes variáveis e seus domínios:

- $y_t \in \{1, \dots, NM\}, \forall t \in \{1, \dots, NM\}$ que indicam qual a matriz a ser executada no tempo t ;
- $b_t \in \{1, \dots, NB\}, \forall t \in \{1, \dots, NM\}$ que indicam o bolster que é usado no tempo t ;
- $ins_t \in \{1, \dots, NIns\}, \forall t \in \{1, \dots, NM\}$ que indicam o insert que é usado no tempo t ;
- $pins_t \in \{1, \dots, NPIns\}, \forall t \in \{1, \dots, NM\}$ que indicam o porta-insert que é usado no tempo t ;
- $pm_t \in \{1, \dots, NPM\}, \forall t \in \{1, \dots, NM\}$ que indicam o porta-matriz que é usado no tempo t ;
- $quantidade_t \in \{250, \dots, 10000\}, \forall t \in \{1, \dots, NM\}$ que indicam a quantidade de quilos a produzir no tempo t ;

E precisamos de definir o seguinte conjunto de restrições que estabelecem relações entre as variáveis:

$$(1) \text{all} - \text{different}(y_1, \dots, y_{NM})$$

$$(2) b_t = \text{Matriz}(y_t).bolster,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM\}$$

$$(3) \sum_{k \in \{t, t+1\}} b_k \leq Nbolster(i),$$

$$\forall i \in \{1, \dots, NB\}, \forall t \in \{1, \dots, NM - 1\}$$

$$(4) ins_t = \text{Matriz}(y_t).insert,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM\}$$

$$(5) \sum_{k \in \{t, t+1\}} ins_k \leq Ninsert(i),$$

$$\forall i \in \{1, \dots, NIns\}, \forall t \in \{1, \dots, NM - 1\}$$

$$(6) pins_t = Matriz(y_t).portainsert,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM\}$$

$$(7) \sum_{k \in \{t, t+1\}} pins_k \leq NportaInsert(i),$$

$$\forall i \in \{1, \dots, NPIns\}, \forall t \in \{1, \dots, NM - 1\}$$

$$(8) pm_t = Matriz(y_t).portamatriz,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM\}$$

$$(9) \sum_{k \in \{t, \dots, t+12\}} pm_k \leq NportaMatriz(i),$$

$$\forall i \in \{1, \dots, NPM\}, \forall t \in \{1, \dots, NM - 12\}$$

$$(10) quantidade_t = Matriz(y_t).quilos,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM\}$$

$$(11) \sum_{k \in \{t, \dots, t+11\}} quantidade_k \geq 5000,$$

$$\forall t \in \{1, \dots, NM - 11\}$$

A restrição número (1) garante que cada matriz é produzida uma única vez.

Com a restrição (2) pretendemos saber qual o bolster que a matriz que está a ser atribuída ao tempo t usa, para que depois na restrição (3) possamos satisfazer a condição (C3), ou seja, que duas matrizes consecutivas que usem o mesmo bolster e do qual só há uma unidade não sejam sequenciadas consecutivamente. Do mesmo modo, com a restrição (4) pretendemos saber qual o insert que a matriz que está a ser atribuída ao tempo t usa para que depois com a restrição (5) duas matrizes consecutivas que usem o mesmo insert e do qual só

existe uma unidade não possam ser sequenciadas uma a seguir à outra, ou seja, que possamos conseguir satisfazer a condição (C4). Com a restrição (6) pretendemos saber qual o porta-insert que a matriz que está a ser atribuída ao tempo t usa para que depois a restrição (7) possa conseguir satisfazer a condição (C5). Com a restrição (8) pretendemos saber qual o porta-matriz que a matriz que está a ser atribuída ao tempo t usa para que depois a restrição (9) possa conseguir satisfazer a condição (C6), isto é, que doze matrizes sequenciadas consecutivamente não excedam as capacidades existentes dos diversos porta-matrizes. Com a restrição (10) pretendemos saber qual a quantidade de quilos que a matriz que está a ser atribuída ao tempo t vai poder produzir, para que depois a restrição (11) possa conseguir satisfazer a condição (C7).

3.3.3 Controlar

Depois de planear e sequenciar da melhor maneira a produção, é necessário efetuar a última etapa do PCP, controlar.

O controlo da produção passa a ser feito diariamente, a fim de ver se as matrizes planeadas no dia anterior produziram ou não as quantidades necessárias para satisfazer o cliente. No caso de não ter sido satisfeita, é necessário encontrar a melhor maneira de solucionar a discrepância obtida, encontrar a melhor ação corretiva. A ação corretiva pode passar por modificar o planeamento do próprio dia ou o do dia seguinte.

4. Resolução de alguns exemplos

Nesta seção pretende-se usar as formulações apresentadas no capítulo anterior para encontrar soluções admissíveis de sequenciamento para 4 exemplos diferentes. Usamos o *software Xpress* para obter os resultados, tendo as formulações sido implementadas no Mosel do *Xpress*.

Em cada exemplo é apresentada uma tabela inicial, onde são apresentadas as características das matrizes para as quais se pretende elaborar o sequenciamento. A tabela é constituída por 6 colunas. Na primeira coluna indica-se o nome da matriz. Para cada uma dessas matrizes e, nas colunas seguintes, é apresentado, no caso de usar, o nº de bolster, o nº do insert e o nº do porta-insert. Na quinta coluna é indicado o nº do porta-matriz que usa e na última coluna, a quantidade de quilos que a matriz vai ter em produção.

Para cada exemplo são apresentadas três soluções que vamos analisar, obtidas usando o *software Xpress*. Uma é a solução obtida usando a formulação em programação linear. As outras são duas das muitas soluções obtidas quando usamos a formulação em programação por restrições. Para efetuar a análise das soluções é necessário ter em consideração os dados presentes no Anexo A, onde estão indicados os diversos tipos de porta-matrizes, bolster's, insert's e porta-insert's bem como a quantidade existente de cada um.

4.1 Exemplo 1

Pretende-se para o primeiro exemplo, elaborar o sequenciamento das matrizes que conjuntamente com as respetivas características estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2: Dados referentes às matrizes do Exemplo 1.

Nome	Bolster nº	Insert nº	Porta-insert nº	Porta-matriz nº	Quantidade (quilos)
PA01.57	7	-	-	3	300
PK40.04	10	-	-	3	3000
PK40.24	-	3	1	7	500
PK40.35	-	1	1	7	500
PK40.46	27	-	-	3	250

PD12.04	10	-	-	3	500
PD12.43	12	-	-	7	600
PF04.25	27	-	-	3	250
PF10.13	-	3	1	7	1000
PF10.24	12	-	-	6	250
PR90.36	9	-	-	7	1000
PR90.98	17	-	-	3	750
PA08.03	-	3	1	7	1900
PA08.05	17	-	-	3	800
PA08.06	22	-	-	3	400
PC11.89	28	-	-	3	250
PV01.18	12	-	-	4	800
PCE01.97	25	-	-	3	600

Podemos observar na Tabela 2 que as matrizes PK40.04 e PD12.04 usam o mesmo bolster pelo que não podem ser colocadas em produção em tempos consecutivos. O mesmo acontece para o conjunto das matrizes PD12.43, PF10.24 e PV01.18 e também para o conjunto das matrizes PR90.98 e PA08.05. Pela Tabela 2 é ainda possível ver que as matrizes PK40.46 e PF04.25 usam o bolster número 27. Contudo, como existem duas unidades do mesmo, não há qualquer problema.

Relativamente aos insert's, podemos verificar que há várias matrizes que usam o insert número 3. Porém, não há qualquer problema uma vez que existem duas unidades deste mesmo insert. Por outro lado, tendo em atenção os porta-insert's, verificamos que as matrizes PK40.24, PK40.35, PF10.13 e PA08.03 usam o mesmo porta-insert, pelo que não podem ser planeadas em tempos consecutivos.

Notamos que este conjunto de matrizes usa os porta-matrizes números 3, 4, 6 e 7. Mais precisamente, dez matrizes usam o porta-matriz nº3, uma matriz usa o porta-matriz nº4, uma matriz usa o porta-matriz nº6 e seis matrizes usam o porta-matriz nº7. Consultando a tabela das quantidades de porta-matrizes existentes presente no Anexo A, existe um total de 12 unidades do porta-matriz nº3, 11 unidades do porta-matrizes nº4, 7 unidades do porta-matriz nº6 e 8 unidades o porta-matriz nº7. Deste modo, as matrizes no seu todo não excedem a capacidade de porta-matrizes existentes, pelo que a condição (C6) irá ser sempre verificada.

A solução corresponde à sequência de produção que foi obtida para este exemplo usando a formulação em programação linear inteira é a seguinte:

- Produzir no tempo 1 a matriz PCE01.97
- Produzir no tempo 2 a matriz PA01.57
- Produzir no tempo 3 a matriz PK40.04
- Produzir no tempo 4 a matriz PK40.24
- Produzir no tempo 5 a matriz PK40.46
- Produzir no tempo 6 a matriz PF10.13
- Produzir no tempo 7 a matriz PD12.04
- Produzir no tempo 8 a matriz PA08.03
- Produzir no tempo 9 a matriz PD12.43
- Produzir no tempo 10 a matriz PK40.35
- Produzir no tempo 11 a matriz PV01.18
- Produzir no tempo 12 a matriz PF04.25
- Produzir no tempo 13 a matriz PF10.24
- Produzir no tempo 14 a matriz PA08.05
- Produzir no tempo 15 a matriz PA08.06
- Produzir no tempo 16 a matriz PR90.98
- Produzir no tempo 17 a matriz PC11.89
- Produzir no tempo 18 a matriz PR90.36

Podemos verificar que a solução obtida está de acordo com as condições impostas relativas aos bolster's, insert's e porta-insert's.

Podemos verificar que as matrizes PK40.04 e PD12.04 que usam o mesmo bolster, uma é executada no tempo 3 e outra no tempo 7. As matrizes PD12.43, PF10.24 e PV01.18, que usam o mesmo insert, são planeadas em tempos separados, sendo que a matriz PD12.43 é planeada para ser a nona matriz a produzir, a matriz PF10,24 para ser décima terceira e a matriz PV01.18 para ser a décima primeira.

Das matrizes que usam o mesmo porta-insert, uma é executada no tempo 4, outra no tempo 6, outra no tempo 8 e outra no tempo 10.

Falta verificar a condição imposta pela condição (C7), sendo que os resultados obtidos para verificar a condição são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Quilos acumulados a partir do instante 12 para a formulação em programação linear inteira.

Instante t	Quilos acumulados em produção no intervalo $[t - 11, t]$
12	10200
13	9850
14	10350
15	7750
16	8000
17	8000
18	8000

É portanto fácil verificar que a solução apresentada é uma solução possível para o sequenciamento da produção do conjunto de matrizes definido na Tabela 2.

Usando a formulação em CP para obter soluções para o mesmo exemplo, uma dessas possíveis soluções é:

- Produzir no tempo 1 a matriz PF10.13
- Produzir no tempo 2 a matriz PK40.46
- Produzir no tempo 3 a matriz PA08.06
- Produzir no tempo 4 a matriz PR90.36
- Produzir no tempo 5 a matriz PF10.24
- Produzir no tempo 6 a matriz PD12.04
- Produzir no tempo 7 a matriz PCE01.97
- Produzir no tempo 8 a matriz PV01.18
- Produzir no tempo 9 a matriz PC11.89
- Produzir no tempo 10 a matriz PK40.04
- Produzir no tempo 11 a matriz PA08.05
- Produzir no tempo 12 a matriz PA08.03
- Produzir no tempo 13 a matriz PF04.25
- Produzir no tempo 14 a matriz PR90.98
- Produzir no tempo 15 a matriz PK40.24
- Produzir no tempo 16 a matriz PD12.43
- Produzir no tempo 17 a matriz PK40.35
- Produzir no tempo 18 a matriz PA01.57

Tal como anteriormente, também para esta solução as restrições impostas relativas aos bolster's, insert's, porta-insert's e porta-matrizes são satisfeitas.

Falta verificar novamente se as quantidades produzidas durante doze matrizes consecutivas a partir do instante 12 excedem os 5000 quilos, sendo estes resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Quilos acumulados a partir do instante 12 para a formulação em programação por restrições.

Instante t	Quilos acumulados em produção no intervalo $[t - 11, t]$
12	10750
13	10000
14	10500
15	10600
16	10200
17	10450
18	10250

Pode afirmar-se que esta é mais uma solução admissível para o problema do sequenciamento da lista de matrizes a produzir que estão representadas na Tabela 2.

Uma outra solução possível obtida usando o modelo em CP passa por ser:

- Produzir no tempo 1 a matriz PA01.57
- Produzir no tempo 2 a matriz PK40.04
- Produzir no tempo 3 a matriz PK40.24
- Produzir no tempo 4 a matriz PK40.46
- Produzir no tempo 5 a matriz PK40.35
- Produzir no tempo 6 a matriz PD12.04
- Produzir no tempo 7 a matriz PD12.43
- Produzir no tempo 8 a matriz PF04.25
- Produzir no tempo 9 a matriz PF10.13
- Produzir no tempo 10 a matriz PF10.24
- Produzir no tempo 11 a matriz PR90.36

- Produzir no tempo 12 a matriz PR90.98
- Produzir no tempo 13 a matriz PA08.03
- Produzir no tempo 14 a matriz PCE01.97
- Produzir no tempo 15 a matriz PA08.05
- Produzir no tempo 16 a matriz PC11.89
- Produzir no tempo 17 a matriz PV01.18
- Produzir no tempo 18 a matriz PA08.06

É possível verificar, tal como já feito para as outras soluções, que as condições são todas verificadas e que esta é mais uma solução admissível para o problema.

Existem de facto bastantes diferenças entre a ordem em que é produzida uma matriz nas diversas soluções. Por exemplo, a matriz PCE01.97 na solução obtida pela formulação em programação linear inteira deve ser a primeira matriz a ser produzida, enquanto nas soluções obtidas pela formulação em programação por restrições é a sétima ou a décima quarta matriz a produzir. Estas discrepâncias também são observadas noutras matrizes, como por exemplo no caso da matriz PR90.36.

Para obter a primeira solução foi usada uma função objetivo, sendo que o modelo vai encontrar a melhor solução admissível. O valor da solução obtida foi de 18. Para obter as outras soluções não foi usada qualquer função objetivo, pelo que as soluções encontradas usando a formulação em *CP* apenas são admissíveis para o problema em questão.

4.2 Exemplo 2

Pretende-se efetuar o sequenciamento de um outro exemplo no qual agora as matrizes e as correspondentes características são indicadas na Tabela 5.

Tabela 5: Dados referentes às matrizes do Exemplo 2.

Nome	Bolster nº	Insert nº	Porta-insert nº	Porta-matriz nº	Quantidade (quilos)
PA01.65	-	3	1	4	750
PA06.70	7	-	-	4	600
PK40.01	7	-	-	4	900

PK40.09	15	-	-	6	350
PK40.10	-	1	1	4	1100
PK40.64	22	-	-	3	250
PB01.58	12	-	-	3	250
PB03.41	7	-	-	3	250
PB04.68	12	-	-	7	250
PB04.76	22	-	-	6	500
PD06.29	25	-	-	3	300
PD08.15	27	-	-	3	1250
PD12.06	11	-	-	7	700
PD12.30	22	-	-	6	300
PF09.16	22	-	-	3	400
PMV07.03	11	-	-	6	250
PC11.72	-	2	1	4	350
PCE00.84	-	33	1	3	500
PCE01.25	22	-	-	3	690
PCE02.13	-	33	1	3	260
PF07.21	12	-	-	7	2750
PF10.30	1	-	-	7	1580

Observando a tabela anterior, existem vários conjuntos de matrizes que não podem ser planeadas em tempo consecutivos, nomeadamente:

- {PK40.64, PB04.76, PD12.30, PF09.16, PCE01.25}
- {PB01.58, PB04.68, PF07.21}
- {PD12.06, PMV07.03}
- {PA01.65, PK40.10, PC11.72, PCE00.84, PCE02.13}

As matrizes que usam o bolster nº7 podem ser planeadas em tempos consecutivos pelo facto de haver duas unidades deste mesmo bolster, dado presente na tabela relativa à quantidade dos bolster's existentes de cada tipo no Anexo A.

Também neste caso, as matrizes a produzir no seu todo não excedem a capacidade de porta-matrizes existentes de cada tipo, uma vez que deste conjunto

de matrizes, nove usam o porta-matriz nº3, cinco usam o porta-matriz nº4, quatro usam o porta-matriz nº6 e quatro usam o porta-matriz nº7 e no total, como se pode ver na tabela da quantidade de porta-matrizes existentes de cada tipo presente no Anexo A, existem doze do tipo nº3, onze do tipo nº4, sete do tipo nº6 e oito do tipo nº7.

Usando a formulação em programação linear inteira, eis a sequência de produção que nos é dada:

- Produzir no tempo 1 a matriz PB01.58
- Produzir no tempo 2 a matriz PK40.10
- Produzir no tempo 3 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 4 a matriz PCE00.84
- Produzir no tempo 5 a matriz PK40.01
- Produzir no tempo 6 a matriz PA01.65
- Produzir no tempo 7 a matriz PK40.09
- Produzir no tempo 8 a matriz PC11.72
- Produzir no tempo 9 a matriz PK40.64
- Produzir no tempo 10 a matriz PB03.41
- Produzir no tempo 11 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 12 a matriz PF07.21
- Produzir no tempo 13 a matriz PD08.15
- Produzir no tempo 14 a matriz PCE01.25
- Produzir no tempo 15 a matriz PB04.68
- Produzir no tempo 16 a matriz PD12.30
- Produzir no tempo 17 a matriz PD06.29
- Produzir no tempo 18 a matriz PF09.16
- Produzir no tempo 19 a matriz PD12.06
- Produzir no tempo 20 a matriz PB04.76
- Produzir no tempo 21 a matriz PMV07.03
- Produzir no tempo 22 a matriz PCE02.13

Tirando a restrição relativa aos quilos, todas as outras são fáceis de mostrar que são verificadas tendo em conta o que já foi escrito. Para verificar então a restrição que falta, vamos proceder à elaboração da Tabela 6, que representa os

quilos acumulados entre doze matrizes consecutivas da sequência acima indicada, a partir do tempo de produção igual a 12.

Tabela 6: Quilos acumulados a partir do instante 12 para a formulação em programação linear inteira.

Instante t	Quilos acumulados em produção no intervalo $[t - 11, t]$
12	9630
13	10630
14	10220
15	9870
16	9670
17	9070
18	8720
19	9070
20	9220
21	9220
22	9230

Para este mesmo exemplo apresentamos duas das possíveis sequências de produção obtidas pela formulação em CP , sendo estas:

Sequência 1:

- Produzir no tempo 1 a matriz PD06.29
- Produzir no tempo 2 a matriz PK40.09
- Produzir no tempo 3 a matriz PCE00.84
- Produzir no tempo 4 a matriz PF09.16
- Produzir no tempo 5 a matriz PMV07.03
- Produzir no tempo 6 a matriz PB03.41
- Produzir no tempo 7 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 8 a matriz PF07.21
- Produzir no tempo 9 a matriz PCE02.13
- Produzir no tempo 10 a matriz PK40.01
- Produzir no tempo 11 a matriz PCE01.25
- Produzir no tempo 12 a matriz PC11.72

- Produzir no tempo 13 a matriz PD08.15
- Produzir no tempo 14 a matriz PK40.10
- Produzir no tempo 15 a matriz PD12.30
- Produzir no tempo 16 a matriz PA01.65
- Produzir no tempo 17 a matriz PB04.68
- Produzir no tempo 18 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 19 a matriz PK40.64
- Produzir no tempo 20 a matriz PD12.06
- Produzir no tempo 21 a matriz PB01.58
- Produzir no tempo 22 a matriz PB04.76

Sequência 2:

- Produzir no tempo 1 a matriz PA01.65
- Produzir no tempo 2 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 3 a matriz PK40.01
- Produzir no tempo 4 a matriz PK40.09
- Produzir no tempo 5 a matriz PK40.10
- Produzir no tempo 6 a matriz PK40.64
- Produzir no tempo 7 a matriz PB01.58
- Produzir no tempo 8 a matriz PB03.41
- Produzir no tempo 9 a matriz PB04.68
- Produzir no tempo 10 a matriz PB04.76
- Produzir no tempo 11 a matriz PD06.29
- Produzir no tempo 12 a matriz PD08.15
- Produzir no tempo 13 a matriz PD12.06
- Produzir no tempo 14 a matriz PD12.30
- Produzir no tempo 15 a matriz PMV07.03
- Produzir no tempo 16 a matriz PC11.72
- Produzir no tempo 17 a matriz PF09.16
- Produzir no tempo 18 a matriz PCE00.84
- Produzir no tempo 19 a matriz PCE01.25
- Produzir no tempo 20 a matriz PF07.21

- Produzir no tempo 21 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 22 a matriz PCE02.13

As soluções obtidas em *CP* vão de encontro às condições relativas aos bolster's, insert's, porta-insert's e porta-matrizes. Fazendo umas contas em relação aos quilos em produção entre cada conjunto de 12 matrizes produzidas em tempos consecutivos, tal como já feito para outros casos, é fácil de verificar que a restrição dos 5000 quilos é verificada.

Entre as soluções obtidas usando a formulação em *CP* existem diferenças entre a ordem a efetuar das matrizes, umas mais acentuadas que outras. Por exemplo, a matriz PD06.29 na sequência 1 deve ser a primeira matriz a produzir e na sequência 2 deve ser a décima primeira. Por outro lado, a matriz PK40.09 deve ser a segunda ou a quarta matriz a produzir, consoante seja a sequência 1 ou a sequência 2, respetivamente. Estas duas matrizes na solução obtida pela formulação em programação linear inteira devem ser a décima sétima e a sétima matriz a produzir.

O valor da função objetivo tendo em conta a formulação em programação linear inteira é de 22.

4.3 Exemplo 3

Na Tabela 7 encontram-se as matrizes e respetivas características para a elaboração do sequenciamento.

Tabela 7: Dados referentes às matrizes do Exemplo 3.

Nome	Bolster nº	Insert nº	Porta-insert nº	Porta-matriz nº	Quantidade (quilos)
PA06.70	7	-	-	4	400
PB03.16	-	3	1	4	400
PB03.62	-	3	1	7	250
PB04.70	11	-	-	3	300
PB04.77	4	-	-	4	850
PD11.05	-	1	1	4	350
PD12.23	12	-	-	7	450
PF10.30	1	-	-	7	2500

PMV07.01	22	-	-	5	250
PV00.01	-	18	1	7	1200
PV00.03	-	3	1	3	400
PC11.43	-	38	1	4	250
PC11.99	-	3	1	3	300
PC12.01	-	2	1	7	600
PC13.65	10	-	-	4	500
PCE00.35	-	41	1	3	575
PCE00.99	28	-	-	6	1900
PCE01.00	29	-	-	3	600
PCE01.19	28	-	-	3	250

Neste caso temos apenas um conjunto de matrizes que não podem ser produzidas em tempos consecutivos, sendo este o conjunto das matrizes que usam o porta-insert nº1, ou seja, {PB03.16, PB03.62, PD11.05, PV00.01, PV00.03, PC11.43, PC11.99, PC12.01, PCE00.35}.

Também para este exemplo são indicadas três soluções, sendo que a primeira é obtida usando a formulação em programação linear inteira e as restantes são obtidas usando a formulação em programação por restrições.

Solução nº1:

- Produzir no tempo 1 a matriz PCE01.19
- Produzir no tempo 2 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 3 a matriz PB03.16
- Produzir no tempo 4 a matriz PB04.70
- Produzir no tempo 5 a matriz PC11.43
- Produzir no tempo 6 a matriz PB04.77
- Produzir no tempo 7 a matriz PB03.62
- Produzir no tempo 8 a matriz PD12.23
- Produzir no tempo 9 a matriz PCE00.35
- Produzir no tempo 10 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 11 a matriz PV00.03
- Produzir no tempo 12 a matriz PMV07.01

- Produzir no tempo 13 a matriz PV00.01
- Produzir no tempo 14 a matriz PC13.65
- Produzir no tempo 15 a matriz PC11.99
- Produzir no tempo 16 a matriz PCE00.99
- Produzir no tempo 17 a matriz PC12.01
- Produzir no tempo 18 a matriz PCE01.00
- Produzir no tempo 19 a matriz PD11.05

Solução nº2:

- Produzir no tempo 1 a matriz PV00.01
- Produzir no tempo 2 a matriz PB04.77
- Produzir no tempo 3 a matriz PCE00.35
- Produzir no tempo 4 a matriz PCE01.19
- Produzir no tempo 5 a matriz PMV07.01
- Produzir no tempo 6 a matriz PD11.05
- Produzir no tempo 7 a matriz PCE01.00
- Produzir no tempo 8 a matriz PCE00.99
- Produzir no tempo 9 a matriz PC12.01
- Produzir no tempo 10 a matriz PB04.70
- Produzir no tempo 11 a matriz PB03.16
- Produzir no tempo 12 a matriz PC13.65
- Produzir no tempo 13 a matriz PC11.43
- Produzir no tempo 14 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 15 a matriz PC11.99
- Produzir no tempo 16 a matriz PD12.23
- Produzir no tempo 17 a matriz PB03.62
- Produzir no tempo 18 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 19 a matriz PV00.03

Solução nº3:

- Produzir no tempo 1 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 2 a matriz PB03.16
- Produzir no tempo 3 a matriz PB04.70

- Produzir no tempo 4 a matriz PB03.62
- Produzir no tempo 5 a matriz PB04.77
- Produzir no tempo 6 a matriz PD11.05
- Produzir no tempo 7 a matriz PD12.23
- Produzir no tempo 8 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 9 a matriz PV00.01
- Produzir no tempo 10 a matriz PMV07.01
- Produzir no tempo 11 a matriz PV00.03
- Produzir no tempo 12 a matriz PC13.65
- Produzir no tempo 13 a matriz PC12.01
- Produzir no tempo 14 a matriz PCE01.19
- Produzir no tempo 15 a matriz PC11.43
- Produzir no tempo 16 a matriz PCE01.00
- Produzir no tempo 17 a matriz PCE00.35
- Produzir no tempo 18 a matriz PCE00.99
- Produzir no tempo 19 a matriz PC11.99

Na solução nº1 temos que a primeira matriz a ser produzida deve ser a PCE01.19. Esta matriz na solução nº2 deve ser a quarta matriz a ser produzida e na solução nº3 deve ser a décima quarta matriz do dia. A matriz PD11.05 na primeira solução deve ser a última matriz a produzir. Por outro lado, na segunda e na terceira soluções por acaso coincidem a ser produzidas no mesmo tempo, no tempo 6. Podemos afirmar que as soluções ainda podem diferir bastantes, embora todas elas sejam soluções admissíveis para o problema. A primeira solução obtida é ótima relativamente à função objetivo, tomando esta o valor de 19.

4.4 Exemplo 4

O último exemplo apresentado, possui como características das matrizes das quais se pretende elaborar o sequenciamento, o representado na Tabela 8.

Tabela 8: Dados referentes às matrizes do Exemplo 4.

Nome	Bolster nº	Insert nº	Porta-insert nº	Porta-matriz nº	Quantidade (quilos)
PA01.17	7	-	-	6	500

PC13.44	8	-	-	4	300
PC14.60	-	24	2	6	500
PC15.69	2	-	-	4	250
PCE00.75	23	-	-	3	500
PCE00.86	9	-	-	3	300
PCE01.23	22	-	-	4	600
PD04.64	8	-	-	3	500
PD08.59	2	-	-	6	250
PV01.16	2	-	-	8	250
PD10.02	19	-	-	3	400
PD11.01	7	-	-	6	400
PD11.10	-	2	1	4	500
PF01.54	-	1	1	3	500
PF06.32	7	-	-	3	250
PF06.33	10	-	-	6	1000
PF09.40	22	-	-	4	300
PJ00.33	2	-	-	4	250
PR90.91	9	-	-	3	500
PR90.92	22	-	-	6	250
PD06.06	7	-	-	4	300
PV00.70	-	28	1	3	500

Pela tabela podemos verificar que as matrizes têm poucas quantidades de quilos a colocar em produção, pelo que se torna conveniente mostrar realmente que a restrição de quilos acumulados é mesmo verificada. A restrição dos bolster's, insert's e porta-insert's é averiguada se o conjunto das matrizes {PC15.69,PD08.59, PV01.16, PJ00.33} ou {PCE01.23,PF09.40, PR90.92} ou {PD11.10, PF01.54, PV00.70} não forem planeadas em tempo consecutivos. Mais uma vez, a restrição dos porta-matrizes também irá ser sempre respeitada pelo facto de não exceder as quantidades existentes de cada tipo.

Tal como nos exemplos anteriores, também neste vou apresentar três soluções, sendo que a primeira solução apresentada foi obtida usando a

formulação em programação linear inteira e as outras duas usando a formulação em *CP*. As soluções são:

Solução nº1:

- Produzir no tempo 1 a matriz PD06.06
- Produzir no tempo 2 a matriz PR90.92
- Produzir no tempo 3 a matriz PV00.70
- Produzir no tempo 4 a matriz PR90.91
- Produzir no tempo 5 a matriz PJ00.33
- Produzir no tempo 6 a matriz PF09.40
- Produzir no tempo 7 a matriz PF01.54
- Produzir no tempo 8 a matriz PF06.32
- Produzir no tempo 9 a matriz PD11.10
- Produzir no tempo 10 a matriz PD11.01
- Produzir no tempo 11 a matriz PF06.33
- Produzir no tempo 12 a matriz PV01.16
- Produzir no tempo 13 a matriz PD10.02
- Produzir no tempo 14 a matriz PD08.59
- Produzir no tempo 15 a matriz PD04.64
- Produzir no tempo 16 a matriz PCE01.23
- Produzir no tempo 17 a matriz PCE00.86
- Produzir no tempo 18 a matriz PCE00.75
- Produzir no tempo 19 a matriz PC15.69
- Produzir no tempo 20 a matriz PC14.60
- Produzir no tempo 21 a matriz PC13.44
- Produzir no tempo 22 a matriz PA01.17

Solução nº2:

- Produzir no tempo 1 a matriz PD10.02
- Produzir no tempo 2 a matriz PC15.69
- Produzir no tempo 3 a matriz PD06.06
- Produzir no tempo 4 a matriz PF01.54
- Produzir no tempo 5 a matriz PV01.16

- Produzir no tempo 6 a matriz PD04.64
- Produzir no tempo 7 a matriz PV00.70
- Produzir no tempo 8 a matriz PR90.92
- Produzir no tempo 9 a matriz PR90.91
- Produzir no tempo 10 a matriz PC13.44
- Produzir no tempo 11 a matriz PJ00.33
- Produzir no tempo 12 a matriz PF06.33
- Produzir no tempo 13 a matriz PD11.10
- Produzir no tempo 14 a matriz PF06.32
- Produzir no tempo 15 a matriz PCE00.86
- Produzir no tempo 16 a matriz PD11.01
- Produzir no tempo 17 a matriz PF09.40
- Produzir no tempo 18 a matriz PA01.17
- Produzir no tempo 19 a matriz PCE01.23
- Produzir no tempo 20 a matriz PD08.59
- Produzir no tempo 21 a matriz PC14.60
- Produzir no tempo 22 a matriz PCE00.75

Solução nº3:

- Produzir no tempo 1 a matriz PA01.17
- Produzir no tempo 2 a matriz PC13.44
- Produzir no tempo 3 a matriz PC14.60
- Produzir no tempo 4 a matriz PC15.69
- Produzir no tempo 5 a matriz PCE00.75
- Produzir no tempo 6 a matriz PCE00.86
- Produzir no tempo 7 a matriz PCE01.23
- Produzir no tempo 8 a matriz PD04.64
- Produzir no tempo 9 a matriz PD08.59
- Produzir no tempo 10 a matriz PD10.02
- Produzir no tempo 11 a matriz PV01.16
- Produzir no tempo 12 a matriz PF06.33
- Produzir no tempo 13 a matriz PD11.01

- Produzir no tempo 14 a matriz PD11.10
- Produzir no tempo 15 a matriz PF06.32
- Produzir no tempo 16 a matriz PF01.54
- Produzir no tempo 17 a matriz PR90.92
- Produzir no tempo 18 a matriz PJ00.33
- Produzir no tempo 19 a matriz PV00.70
- Produzir no tempo 20 a matriz PR90.91
- Produzir no tempo 21 a matriz PD06.06
- Produzir no tempo 22 a matriz PF09.40

Nas tabelas nº 9, 10 e 11, encontram-se os quilos acumulados entre todos os conjuntos de doze matrizes consecutivas para as soluções nº 1, 2 e 3 deste exemplo, respetivamente.

Tabela 9: Quilos acumulados a partir do instante 12 na Solução nº1.

Instante t	Quilos acumulados em produção no intervalo $[t - 11, t]$
12	5000
13	5100
14	5100
15	5100
16	5200
17	5250
18	5450
19	5200
20	5450
21	5250
22	5350

Tabela 10: Quilos acumulados a partir do instante 12 na Solução nº2.

Instante t	Quilos acumulados em produção no intervalo $[t - 11, t]$
12	5000
13	5100
14	5100

15	5100
16	5000
17	5050
18	5050
19	5150
20	5150
21	5150
22	5350

Tabela 11: Quilos acumulados a partir do instante 12 na Solução nº3.

Instante t	Quilos acumulados em produção no intervalo $[t - 11, t]$
12	5350
13	5250
14	5450
15	5200
16	5450
17	5200
18	5150
19	5050
20	5050
21	5100
22	5000

Fica portanto claro, com as tabelas anteriores que a restrição dos quilos está a ser verificada.

Em todos os exemplos apresentados, a restrição dos porta-matrizes nunca foi posta em causa. De facto, tratando-se de exemplos reais, é muito raro ter de se efetuar um sequenciamento tendo em conta os porta-matrizes. Vamos, portanto, construir um exemplo onde haja essa eventualidade. Para isso vamos considerar o exemplo nº4 e a esse exemplo efetuar algumas alterações.

Vamos supor que as três últimas matrizes presentes na Tabela 8 (tabela onde estão indicadas as matrizes e as respetivas características das quais se pretende elaborar o sequenciamento) ou seja, PR90.92, PD06.06 e PV00.70 em vez

de usarem os porta-matrizes nº 6, 4 e 3 passam a usar o porta-matriz nº8. Assim sendo, estas matrizes e o PV01.16 usam o porta-matriz do tipo nº8 e, como apenas existem duas unidades do mesmo, não podem ser planeadas mais do que duas matrizes num intervalo de 13 matrizes consecutivas, facto que não acontece nas soluções encontradas. Por este mesmo motivo, tornou-se conveniente esta alteração.

Com este exemplo reformulado, a solução obtida usando a formulação em programação linear inteira, indica-nos que a matriz PR90.92 deve ser a primeira matriz do dia a produzir e a matriz PV01.16 deve ser a sétima. Ainda na mesma solução, a matriz PV00.70 deve ser a décima quinta e a matriz PD06.06 deve ser a última matriz a produzir. De facto, é visível que a restrição dos porta-matrizes é considerada quando se usa a formulação em programação linear inteira.

Aplicando o mesmo exemplo à formulação em *CP*, a solução obtida indica-nos que a matriz PD06.06 deve ser a terceira matriz do dia e que a matriz PV01.16 deve ser a quinta. Por sua vez, a matriz PV00.70 deve ser a décima sétima, enquanto a matriz PR90.92 deve ser a vigésima segunda matriz a ser produzida.

É portanto visível que embora as soluções obtidas têm em consideração o número e a quantidade de porta-matrizes existentes. Como também têm em consideração os *bolster's*, *insert's*, e *porta-insert's*, os programas estão a elaborar um sequenciamento que vai de encontro com as restrições pretendidas.

5. Formulações com Prioridades

Tendo em conta que existe uma grande diversidade de soluções para cada problema, pretende-se agora elaborar um melhoramento às formulações de modo a obter soluções que estejam de acordo com um objetivo mais específico. Deste modo, vamos proceder a alterações às formulações elaboradas, onde o objetivo neste caso passa por minimizar o tempo de espera das matrizes mais prioritárias, sendo para tal necessário atribuir valores de prioridade às mesmas: a matriz toma um valor de 10 se é muito prioritária, 5 se é de prioridade intermédia e 1 se é pouco prioritária.

Para elaborar ambas as formulações, torna-se necessário definir:

- $Matriz(m).prioridade \in \{1, 5, 10\}$ indica a prioridade da matriz $m, \forall m \in CM$

A formulação em programação linear inteira passa por ter as mesmas restrições que a já formulada, apenas a função a minimizar é diferente. Pretende-se que tendo em conta todas as restrições já indicadas no capítulo 3, o modelo elabore o melhor sequenciamento mas agora tendo em conta que deve sequenciar sempre que possível as matrizes que ainda faltam de prioridade maior. Esta função objetivo pode ser descrita da seguinte forma:

$$\min \sum_{t, m \in CM} Matriz(m).prioridade * t * x_{t, m}$$

No caso da formulação em programação por restrições, é imprescindível definir uma nova variável, sendo esta:

- $pri_t \in \{1, 5, 10\}, \forall t \in \{1, \dots, NM\}$ que indicam a prioridade da matriz a produzir no tempo t ;

É fundamental ainda saber o número de matrizes que existem de cada prioridade, definindo para tal três constantes:

- p_{10} que indica o número de matrizes que têm prioridade máxima, o valor 10.
- p_5 que indica o número de matrizes que têm prioridade intermédia, o valor 5.
- p_1 que indica o número de matrizes que têm prioridade mínima, o valor 1.

A formulação em *CP* para efetuar este sequenciamento precisa de mais algumas restrições, para além das já existentes, mais propriamente:

$$(13) \text{ } pri_t = 10, \quad \forall t \in \{1, \dots, p_{10}\}$$

$$(14) \text{ } pri_t \geq 5, \quad \forall t \in \{1, \dots, p_{10} + p_5\}$$

$$(15) \text{ } pri_t \geq 1, \quad \forall t \in \{1, \dots, NM\}$$

Estas restrições garantem que as matrizes de prioridade 10 são todas sequenciadas primeiro que as de prioridade 5. Por sua vez, estas são sequenciadas primeiro que as de prioridade 1. Contudo, no caso de tal não ser possível é necessário que se façam alterações às restrições, de acordo com soluções obtidas.

Neste caso, vamos ter uma função objetivo que vai ter o mesmo objetivo que o problema em formulação em programação linear inteira, sendo esta:

$$\min \sum_{t \in CM} pri_t * t$$

Estas novas formulações vão ser aplicadas aos Exemplos 1 e 3 definidos no capítulo anterior. Primeiro, é necessário definir as prioridades relativas às matrizes. A Tabela 12 representa as prioridades das matrizes apresentadas no Exemplo 1.

Tabela 12: Prioridades das matrizes do Exemplo 1.

Nome	Prioridade
PA01.57	1
PK40.04	5
PK40.24	10
PK40.35	10
PK40.46	5
PD12.04	5
PD12.43	1
PF04.25	1
PF10.13	5
PF10.24	5
PR90.36	10
PR90.98	1

PA08.03	10
PA08.05	10
PA08.06	1
PC11.89	1
PV01.18	5
PCE01.97	5

Pretendemos que as matrizes PK40.24, PK40.35, PR90.36, PA08.03 e PA08.05 sejam sequenciadas primeiro que o conjunto de matrizes {PK40.04, PK40.46, PD12.04, PF10.13, PF10.24, PV01.18, PCE01.97}. As restantes matrizes, PA01.57, PD12.43, PF04.25, PR90.98, PA08.06 e PC11.89, devem ser das últimas a ser produzidas. Contudo, é importante que as restantes condições impostas também sejam verificadas, pelo que nem pode ser possível que as matrizes de prioridade máxima sejam sequenciadas primeiro que as de prioridade inferiores.

Usando a formulação em programação linear inteira, a solução obtida é:

- Produzir no tempo 1 a matriz PK40.24
- Produzir no tempo 2 a matriz PA08.05
- Produzir no tempo 3 a matriz PA08.03
- Produzir no tempo 4 a matriz PR90.36
- Produzir no tempo 5 a matriz PK40.35
- Produzir no tempo 6 a matriz PCE01.97
- Produzir no tempo 7 a matriz PD12.04
- Produzir no tempo 8 a matriz PF10.24
- Produzir no tempo 9 a matriz PK40.04
- Produzir no tempo 10 a matriz PV01.18
- Produzir no tempo 11 a matriz PF10.13
- Produzir no tempo 12 a matriz PK40.46
- Produzir no tempo 13 a matriz PD12.43
- Produzir no tempo 14 a matriz PA01.57
- Produzir no tempo 15 a matriz PR90.98
- Produzir no tempo 16 a matriz PF04.25
- Produzir no tempo 17 a matriz PA08.06

- Produzir no tempo 18 a matriz PC11.89

Usando a formulação em programação por restrições, uma das possíveis soluções é:

- Produzir no tempo 1 a matriz PK40.24
- Produzir no tempo 2 a matriz PR90.36
- Produzir no tempo 3 a matriz PK40.35
- Produzir no tempo 4 a matriz PA08.05
- Produzir no tempo 5 a matriz PA08.03
- Produzir no tempo 6 a matriz PK40.04
- Produzir no tempo 7 a matriz PK40.46
- Produzir no tempo 8 a matriz PD12.04
- Produzir no tempo 9 a matriz PF10.13
- Produzir no tempo 10 a matriz PF10.24
- Produzir no tempo 11 a matriz PCE01.97
- Produzir no tempo 12 a matriz PV01.18
- Produzir no tempo 13 a matriz PA01.57
- Produzir no tempo 14 a matriz PD12.43
- Produzir no tempo 15 a matriz PF04.25
- Produzir no tempo 16 a matriz PR90.98
- Produzir no tempo 17 a matriz PA08.06
- Produzir no tempo 18 a matriz PC11.89

As soluções obtidas pelas duas formulações já não variam tanto entre elas pelo facto de haver prioridades e de existir uma função objetivo mais concreta e comum a ambas as formulações. É possível de ver que com as restrições todas, é possível que as matrizes de prioridade superior sejam concluídas primeiro que as de prioridade imediatamente anterior. Assim sendo, as matrizes de prioridade 10 em qualquer solução que se vá encontrar devem ser sempre as primeiras cinco matrizes a produzir. De igual modo, as últimas seis matrizes a produzir são as de prioridade 1, sendo que entre estas produções se encontram todas as matrizes com prioridade 5.

Estas soluções são ótimas face à função objetivo, pelo que todas elas têm o mesmo valor. Este valor é de 558.

Vamos aplicar as formulações a mais um exemplo ao Exemplo 3. A Tabela 13 representa as prioridades das matrizes deste mesmo exemplo.

Tabela 13: Prioridades das matrizes do Exemplo 3.

Nome	Prioridade
PA06.70	1
PB03.16	5
PB03.62	10
PB04.70	1
PB04.77	5
PD11.05	5
PD12.23	5
PF10.30	5
PMV07.01	5
PV00.01	1
PV00.03	10
PC11.43	10
PC11.99	10
PC12.01	10
PC13.65	5
PCE00.35	5
PCE00.99	5
PCE01.00	5
PCE01.19	1

Consultando a Tabela 7 e consolidando a informação aí presente com a Tabela 13, pretendemos que as matrizes PB03.62, PV00.03 PC11.43, PC11.99 e PC12.01 sejam as primeiras a ser efetuadas. Contudo, é de esperar que a solução obtida por qualquer uma das formulações não planeie estas matrizes todas em primeiro lugar uma vez que todas usufruem do mesmo porta-insert e só há uma

unidade de cada. É de esperar que entre as matrizes de prioridade 10, se encontre sequenciada uma matriz de prioridade 5.

A solução obtida usando a formulação em programação linear inteira é:

- Produzir no tempo 1 a matriz PB03.62
- Produzir no tempo 2 a matriz PD12.23
- Produzir no tempo 3 a matriz PV00.03
- Produzir no tempo 4 a matriz PCE01.00
- Produzir no tempo 5 a matriz PC11.99
- Produzir no tempo 6 a matriz PCE00.99
- Produzir no tempo 7 a matriz PC12.01
- Produzir no tempo 8 a matriz PMV07.01
- Produzir no tempo 9 a matriz PC11.43
- Produzir no tempo 10 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 11 a matriz PB03.16
- Produzir no tempo 12 a matriz PB04.77
- Produzir no tempo 13 a matriz PD11.05
- Produzir no tempo 14 a matriz PC13.65
- Produzir no tempo 15 a matriz PCE00.35
- Produzir no tempo 16 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 17 a matriz PV00.01
- Produzir no tempo 18 a matriz PB04.70
- Produzir no tempo 19 a matriz PCE01.19

A solução obtida é de facto ótima, uma vez que todas as matrizes com prioridade máxima são sequenciadas assim que possível. Como era de esperar, matrizes com prioridade 5 são intercaladas na sequência com as de prioridade 10 e as de prioridade 1 são as últimas a entrarem na sequência. O valor da função objetivo neste caso é de 795.

Usando a formulação em *CP* esta não nos fornece qualquer solução, pelo que podemos afirmar que pelas condições impostas não existem soluções admissíveis. Por vezes, irá ser necessário alterar ou mesmo eliminar as condições (13) ou (14). A primeira matriz a produzir tem de ser sempre de prioridade 10, pelo que podemos indicar como restrição $pri_1 = 10$. Agora temos de ir testando novas

restrições de modo a tentar encontrar uma formulação que nos forneça a solução ótima.

Se retirarmos apenas a restrição (13), uma das soluções obtidas é:

- Produzir no tempo 1 a matriz PC12.01
- Produzir no tempo 2 a matriz PB04.77
- Produzir no tempo 3 a matriz PCE00.35
- Produzir no tempo 4 a matriz PCE01.19
- Produzir no tempo 5 a matriz PMV07.01
- Produzir no tempo 6 a matriz PD11.05
- Produzir no tempo 7 a matriz PCE01.00
- Produzir no tempo 8 a matriz PCE00.99
- Produzir no tempo 9 a matriz PC11.99
- Produzir no tempo 10 a matriz PB04.70
- Produzir no tempo 11 a matriz PC11.43
- Produzir no tempo 12 a matriz PC13.65
- Produzir no tempo 13 a matriz PV00.01
- Produzir no tempo 14 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 15 a matriz PV00.03
- Produzir no tempo 16 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 17 a matriz PB03.62
- Produzir no tempo 18 a matriz PD12.23
- Produzir no tempo 19 a matriz PB03.16

O valor da função objetivo quando é dada esta solução é de 1043, que se encontra muito longe do valor obtido pela solução da formulação em programação linear inteira. Portanto, esta solução está longe de ser considerada ótima, apesar de ser admissível.

Vamos supor agora uma restrição que nos indique que nas primeiras 5 matrizes (número de matrizes que existem com prioridade 10) do sequenciamento obtido, no máximo duas têm prioridade 5, ou seja, a restrição

$$\sum_{t \in \{1, \dots, p_{10}\}: pri_t=5} 1 \leq 2$$

Uma das soluções obtidas neste caso é a seguinte:

- Produzir no tempo 1 a matriz PC12.01
- Produzir no tempo 2 a matriz PB04.77
- Produzir no tempo 3 a matriz PCE00.35
- Produzir no tempo 4 a matriz PCE01.19
- Produzir no tempo 5 a matriz PV00.03
- Produzir no tempo 6 a matriz PMV07.01
- Produzir no tempo 7 a matriz PCE01.00
- Produzir no tempo 8 a matriz PCE00.99
- Produzir no tempo 9 a matriz PC11.99
- Produzir no tempo 10 a matriz PB04.70
- Produzir no tempo 11 a matriz PC11.43
- Produzir no tempo 12 a matriz PD12.23
- Produzir no tempo 13 a matriz PB03.16
- Produzir no tempo 14 a matriz PC13.65
- Produzir no tempo 15 a matriz PD11.05
- Produzir no tempo 16 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 17 a matriz PB03.62
- Produzir no tempo 18 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 19 a matriz PV00.01

O valor da função objetivo é de 961. Podemos verificar que é dito que uma matriz de prioridade 1 deve ser produzida no tempo 4. No lugar dessa matriz poderia estar uma matriz com prioridade maior e com a mesma tonelagem, não afetando as outras restrições impostas como o caso da matriz que diz que deve ser produzida em sexto lugar, a matriz PMV07.01, sendo que então a matriz PCE01.19 seria produzida no tempo 6. Esta alteração traria uma melhoria da função objetivo, tomando esta o valor de 953. Como se pode verificar, esta alteração já iria minimizar a função objetivo. Assim sendo, esta solução é admissível para o problema em causa, mas não é ótima.

Vamos agora supor para além da restrição (14), a existência de uma restrição que nos indique que nas primeiras 10 matrizes (dobro do número de matrizes que existem com prioridade 10) do sequenciamento obtido, exatamente metade têm prioridade 10, ou seja, a restrição

$$\sum_{t \in \{1, \dots, 2 * p_{10}\}: pri_t = 10} 1 = 5$$

A solução obtida passa por ser:

- Produzir no tempo 1 a matriz PC12.01
- Produzir no tempo 2 a matriz PCE00.99
- Produzir no tempo 3 a matriz PC11.43
- Produzir no tempo 4 a matriz PB04.77
- Produzir no tempo 5 a matriz PB03.62
- Produzir no tempo 6 a matriz PCE01.00
- Produzir no tempo 7 a matriz PC11.99
- Produzir no tempo 8 a matriz PD12.23
- Produzir no tempo 9 a matriz PV00.03
- Produzir no tempo 10 a matriz PF10.30
- Produzir no tempo 11 a matriz PCE00.35
- Produzir no tempo 12 a matriz PC13.65
- Produzir no tempo 13 a matriz PB03.16
- Produzir no tempo 14 a matriz PMV07.01
- Produzir no tempo 15 a matriz PD11.05
- Produzir no tempo 16 a matriz PCE01.19
- Produzir no tempo 17 a matriz PA06.70
- Produzir no tempo 18 a matriz PV00.01
- Produzir no tempo 19 a matriz PB04.70

O valor desta solução é de 795. Uma vez que todas as matrizes com prioridade 10 usam o mesmo porta-insert, o sequenciamento obtido tem de as intercalar com outras matrizes que não usem o porta-insert. Como se pretende que as matrizes mais prioritárias sejam feitas primeiro, as matrizes a serem intercaladas, se possível têm de ser prioridade 5. As últimas matrizes a produzir

devem ser as de prioridade 1. Como o descrito é verificado, esta é uma solução ótima.

De facto, o valor da função objetivo desta solução coincide com o valor da função objetivo obtido para a solução resultante da formulação em programação linear inteira, o que comprova a otimalidade desta solução.

As soluções ainda diferem entre si. Por exemplo a matriz PC12.01 na primeira solução ótima obtida deve ser a sétima matriz a produzir, enquanto na segunda solução ótima obtida deve ser a primeira. Tal como visto para esta matriz, pode ser visto para outras, como o caso da matriz PMV07.01 ou o caso do PCE01.00. Existem outras, como o caso da matriz PF10.30, que em ambas as soluções é efetuada na mesma ordem.

6. Conclusões

O estágio tornou-se uma fonte de aplicação de conhecimentos adquiridos durante o percurso académico, além de ter possibilitado o conhecimento do mundo de trabalho.

Com este projeto, pode afirmar-se que a existência e melhoria contínua do planeamento e controlo de produção são essenciais numa organização, a fim de tornar o PCP um processo eficaz e eficiente.

O projeto focou-se no desenvolvimento de modelos matemáticos que permitem o sequenciamento da produção tendo em conta todas as variáveis envolvidas no processo produtivo. No entanto, também foi necessário encontrar uma forma adequada de selecionar a produção do dia e controlar a produção. Conciliar o que planear em cada dia com as rotas de veículos torna-se uma mais-valia, uma vez que permite obter uma menor percentagem de entregas de encomendas fora do prazo, embora este tema não tenha sido muito abordado no projeto. Por outro lado, realizar um controlo de produção diário permitiu aumentar a velocidade de resposta face à necessidade de elaboração de ações corretivas, isto quando a comparação entre o planeado e o produzido gera discrepâncias.

Os modelos matemáticos foram aplicados no *software Xpress*, para os quais foram elaborados duas formulações distintas, uma em programação linear inteira e outra em programação por restrições (*CP*). Neste último caso, a formulação não necessita ter uma função objetivo.

A formulação em *CP* acaba por obter mais soluções admissíveis quando comparada com a formulação em programação linear inteira, que apenas obtém uma. Quando não consideramos função objetivo na formulação em *CP* e uma função objetivo muito geral no caso da formulação em programação linear inteira, todas as soluções obtidas além de serem admissíveis são ótimas. No entanto, ao ter um objetivo mais claro a alcançar na função objetivo esta é usada tanto na formulação em *CP*, como na formulação em programação linear inteira. Neste caso, é possível que para obter as soluções ótimas em *CP* seja necessário inserir novas restrições consoante soluções obtidas, tornando esta formulação pouco aconselhável. Portanto, a formulação em *CP* deve ser mais usada quando não há

função objetivo. Caso contrário, é mais vantajoso o uso da formulação em programação linear inteira,

Em termos de investigação futura, seria interessante um estudo aprofundado de quantidades ótimas a produzir de cada vez que uma matriz vai à prensa, ou seja, um estudo sobre dimensionamento de lotes.

Bibliografia e Webgrafia

<http://www.infoescola.com/engenharia/extrusao/>

<http://www.prebuildaluminios.com>

Bolsi, P. (2011). *Diagnóstico: Planejamento e Controle da Produção nas pequenas e médias indústrias de alimentos do extremo oeste de Santa Catarina*. Monografia de Pós-Graduação apresentada à Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Santa Catarina.

Chiavenato, I. (1990). *Iniciação ao Planejamento e Controle de Produção*. São Paulo: McGraw-Hill.

Chiavenato, I. (2004). *Introdução à teoria geral da administração*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda.

Chiavenato, I. (2008). *Planejamento e Controle da Produção*. São Paulo: Manole.

Furlanetto, A. (2004). *Planejamento Programação e Controle da Produção*. Dissertação de Pós-Graduação apresentada à Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

Júnior, A. (2007). *Problema de Sequenciamento em uma Máquina com Penalidades por Antecipação e atraso: Modelagem e Resolução*. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte.

Landmann, R. (2005). *Um Modelo Heurístico para a Programação da Produção em Funções com utilização da lógica fuzzy*. Dissertação de Pós-Graduação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Lopes, J. (2008). *Análise e otimização do Sequenciamento de Produção de uma empresa de médio porte de embalagens plásticas*. Monografia de Graduação apresentada à Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais.

Manual de Gestão da Prébuild Alumínios, 2014.

Neder, A., & Vaz, F. (2013). *Análise Crítica da implantação de um software de planejamento, programação e sequenciamento da produção em uma indústria petroquímica*. Dissertação de Graduação apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Oliveira, D. (2008). *Implementação de um sistema MRP: o caso da JMS*. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade de Aveiro, Aveiro.

Russomano, V. (1995). *Planejamento e Controle da Produção*. São Paulo: Pioneira.

Sequenciamento de Produção com Restrição na Ordem de Precedência. *Revista GEINTEC*. Obtido a 4 de Fevereiro de 2014, de Web site: <http://www.revistageintec.net/portal/index.php/revista/article/view/57/117>.

Slack, N., (1993). *Vantagem Competitiva em Manufatura*. São Paulo: Atlas.

Tubino, D. (2000). *Manual de Planejamento e Controle da Produção*. São Paulo: Atlas.

Xpress-Kalis Reference Manual, Release 9.1.

Xpress-Kalis User Guide, Release 9.1.

Anexo A – Lista de dados

Neste anexo estão incluídas tabelas contendo dados necessários.

Na tabela seguinte incluímos os 8 porta-matrizes existentes e a respetiva quantidade de cada um.

Porta Matriz nº	Nome	Quantidade
1	PM200.115	2
2	PM246.115	2
3	PM246.140	12
4	PM246.160	11
5	PM247.140	2
6	PM280.140	7
7	PM280.160	8
8	PM318.160	2

Na tabela seguinte listamos os 30 bolster's existentes e a respetiva quantidade de cada um.

Bolster nº	Nome	Quantidade
1	B1R.1T: Posição T	1
2	B1Q.1T: Posição T	1
3	B1V.1T: Posição T	1
4	B1D.1T: Posição T	1
5	B2A.1T: Posição C	1
6	B2A.1T: Posição E	1
7	B2O.2T: Posição C	2
8	B2O.2T: Posição E	2
9	B2N.2T: Posição C	1
10	B2C.1T: Posição C	1
11	B2C.1T: Posição E	1
12	B2Z.1T: Posição D	1
13	B02.Z: Posição D	1
14	B2H.3T: Posição C	1
15	B2H.3T: Posição D	1

Bolster nº	Nome	Quantidade
16	B2H.3T: Posição E	1
17	B3O.1T: Posição T	1
18	B3C.1T: Posição T	1
19	B4H.3T: Posição C	1
20	B4H.3T: Posição D	1
21	B4H.3T: Posição E	1
22	B4O.1T: Posição C	1
23	B4C.1T: Posição C	1
24	B4C.1T: Posição E	1
25	B4R.2T: Posição C	1
26	B4R.2T: Posição D	1
27	B6O.2T: Posição C	2
28	B6O.2T: Posição E	2
29	B6A.1T: Posição C	1
30	B6A.1T: Posição E	1

Na tabela seguinte citamos os 41 insert's existentes e a respetiva quantidade de cada um.

Insert nº	Nome	Quantidade
1	I01.01	1
2	I01.02	1
3	I01.03	2
4	I01.04	1
5	I01.05	1
6	I01.06	1
7	I01.07	1
8	I01.14	1
9	I01.15	1
10	I01.16	1
11	I01.17	1
12	I01.18	1
13	I01.19	1
14	I01.20	1
15	I01.21	1
16	I01.22	1
17	I01.23	1
18	I01.24	1
19	I01.25	1
20	I01.26	1
21	I01.27	1

Insert nº	Nome	Quantidade
22	I01.28	1
23	I01.29	1
24	I01.30	1
25	I01.31	1
26	I01.32	1
27	I02.01	1
28	I02.04: Posição C	1
29	I02.04: Posição E	1
30	I02.05	1
31	I02.06	1
32	I02.07	1
33	I02.09	1
34	I02.10	1
35	I02.11	1
36	I02.12	1
37	I02.13	1
38	I04.01	1
39	I04.02	1
40	I06.01	1
41	I08.01	1

Na seguinte tabela citamos os 2 porta-insert's existentes e a respetiva quantidade de cada um.

Porta Insert nº	Nome	Quantidade
1	PI00.01	1
2	PI00.02	1